

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ТАТАРЧУК ДМИТРО ДМИТРОВИЧ**



УДК 621.372+621.3.018.12+621.3.018.411+621.396.69

**КЕРОВАНІ КОМПОЗИТНІ СТРУКТУРИ  
МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ**

**05.27.01 – твердотільна електроніка**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Київ – 2020**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий  
консультант:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Поплавко Юрій Михайлович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри мікроелектроніки

**Офіційні опоненти:**

доктор хімічних наук, професор, академік НАН  
України

**Білоус Анатолій Григорович,**  
інститут загальної та неорганічної хімії НАН  
України, керівник відділу хімії твердого тіла;

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Завісяк Ігор Володимирович**  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка, професор кафедри квантової  
радіофізики;

доктор технічних наук, професор  
**Осадчук Олександр Володимирович**  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри радіотехніки.

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «19» листопада 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.08,  
к.т.н, доцент



В. Г. Артюхов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність проблеми.

Останнім часом в електроніці все ширше використовують композитні матеріали. Це пов'язано з можливістю формувати електричні та механічні характеристики таких матеріалів шляхом підбору їх якісного і кількісного складу, форми частинок компонентів, геометрії взаємного розміщення (зв'язності) компонентів. В залежності від зв'язності компонентів можливі три основних ефекти взаємодії їх властивостей: ефект суми, ефект комбінації та ефект добутку, що дозволяє не лише підсилювати або послаблювати у композитному матеріалі властивості його компонентів, але і отримувати принципово нові властивості, яких не мають компоненти композиту. Зважаючи на вказані особливості композитів доцільною є розробка композитних матеріалів НВЧ та структур на їх основі, в тому числі керованих. Однак на тепер розробка таких структур є складною задачею, яка вимагає дуже високої кваліфікації розробника і великих затрат обчислювальних ресурсів. Тому дана робота направлена на вирішення важливої технічної проблеми створення адаптованого до інженерного використання системного підходу до розробки композитних компонентів НВЧ та керованих систем на їх основі.

Композити, що складаються з декількох діелектричних шарів (неоднорідні діелектрики), виготовляються з компонентів з різними електричними властивостями. Композити, використовувані в електроніці, часто складаються з двох і більше різних матеріалів. Наприклад, пластмаси (які складаються з полімеру і наповнювача), пористі матеріали, матеріали на основі різних волокон і т.д. Різні види діелектричних керамік також відносяться до неоднорідних матеріалів, які складаються з кристалічної дисперсної фази, склоподібної матриці і повітряних пор (поява яких неминуче). Наявність повітряних пор, як правило, небажана, однак у багатьох випадках їх вводять спеціально для зниження діелектричної проникності різних керамічних і полімерних матеріалів.

Найбільш поширені у техніці НВЧ композити на основі полімерів. Наприклад, змішуючи полімер (тефлон), який має  $\epsilon = 2$  і  $\text{tg}(\delta) \sim 10^{-5}$ , з дрібнодисперсною керамікою, яка має  $\epsilon = 100$  і  $\text{tg}(\delta) \sim 10^{-3}$  (рутилом), отримують композитні НВЧ діелектрики з  $\epsilon = 2 \dots 40$  и  $\text{tg}(\delta) \sim 10^{-3}$ . Ці матеріали широко використовують у пристроях сантиметрового та дециметрового діапазонів довжин хвиль. З іншого боку матричні суміші тефлону з мініатюрними кварцевими сферами дозволяють отримати діелектрики з низьким значенням  $\epsilon = 2 \dots 1.3$ , що важливо у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Зазвичай діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат складових частин композиту – постійні величини. Однак, якщо композит містить параелектричну плівку, діелектрична проникність якої залежить від прикладеного електричного поля, то такий матеріал може бути використаний для створення фільтрів, фазообертачів і інших «активних» НВЧ пристроїв з електричним керуванням. Дослідження електродинамічних властивостей таких матеріалів є важливим завданням.

Розглянуті вище матеріали відносяться до мікротекстурованих композитних матеріалів, у яких розмір неоднорідних включень значно менший за довжину

електромагнітної хвилі. Такі матеріали характеризуються технологічністю, пластичністю, низьким рівнем діелектричних втрат. Їх діелектрична проникність лежить в межах від 1,1 до 50.

Однак не менш цікавими з точки зору практичного використання у техніці НВЧ є макротекстуровані композитні матеріали, які складаються з різноманітних компонентів, розміри яких порівнянні з довжиною електромагнітної хвилі. В техніці НВЧ відомо багато різноманітних конструкцій такого типу. До них можна віднести складені діелектричні резонатори СДР, різноманітні лінії передач тощо.

Проведені нами дослідження показали, що одним з ефективних шляхів вирішення актуальних задач електроніки НВЧ є використання як мікротекстурованих так і макротекстурованих композитів та структур на їх основі.

Використання таких структур дозволяє суттєво розширити функціональні можливості НВЧ пристроїв. На їх основі можуть бути розроблені керовані частотноселективні пристрої НВЧ, методи дослідження НВЧ характеристик матеріалів, захисні покриття тощо.

На сьогоднішній день велику кількість робіт присвячено методам аналізу властивостей композитних матеріалів. Кожен з розроблених методів має свої недоліки та переваги, а також свою область застосування, які визначаються базовими припущеннями та спрощеннями, використаними при виводі аналітичних виразів в рамках тієї чи іншої теорії. Однак сам факт наявності такої великої кількості вузькоспеціалізованих підходів свідчить про відсутність комплексного підходу до дослідження і аналізу властивостей композитних матеріалів, що вказує на незавершеність досліджень і необхідність їх продовження для формування нового наукового напрямку «Композитні структури та пристрої НВЧ з електричним і оптичним керуванням».

В свою чергу, ці дослідження вимагають не тільки використання різноманітних відомих НВЧ методів вимірювання, але й пошуку нових методів дослідження діелектричних параметрів, особливо тонких плівок на НВЧ. В зв'язку з цим автором із співробітниками на основі використання багат шарових композитних макротекстур розроблено методи вимірювання НВЧ характеристик матеріалів, які дозволяють вимірювати діелектричну проникність ( $\epsilon$ ) а також діелектричні втрати ( $\text{tg}\delta$ ) пластин, плівок, рідин та газів з достатньо високою точністю.

Накопичений нами багаторічний досвід вивчення надвисокочастотних властивостей сегнетоелектричних матеріалів дозволив ефективно використовувати наші методи в сучасних дослідженнях для вивчення властивостей сегнетоелектричних плівок на напівпровідникових підкладках.

Результати досліджень композитних структур були застосовані нами при проектуванні й створенні пристроїв НВЧ з електричним керуванням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Результати представлені автором дисертаційної роботи були отримані під час виконання наступних держбюджетних робіт:

- "Розробка і конструювання фільтрів НВЧ на діелектричних і напівпровідникових структурах з Е-типом коливальності". Номер держ. реєстрації 0195 U 000128 (виконавець)
- "Мікроелектронні керуючі пристрої на основі діелектричних резонансних елементів". Номер держреєстрації 0197U005323 (виконавець);
- "Надвисокочастотний діелектричний резонатор з електронним керуванням резонансною частотою". Номер держреєстрації № 0197U014505(виконавець);
- "Дослідження властивостей смужкових фільтрів з керованою зміною частоти на основі актюаторів, інтегрованих з діелектричними резонаторами." Номер держреєстрації 0100U000624. Договір д/б №2393 (виконавець);
- "Розробка і дослідження спеціальних діелектричних матеріалів та створення на їх основі електричнокерованих надвисокочастотних пристроїв. " Номер держреєстрації 0103U001042. Договір д/б № 2612 .(виконавець);
- "Наноматеріали для електронних схем високої інтеграції". Номер держреєстрації 0109U005499 (відповідальний виконавець);
- "Захист чутливого електронного обладнання від впливу електромагнітних завад із застосуванням матеріалів, виготовлених за нанотехнологіями". Номер держреєстрації 0109U004190 (виконавець);
- "Розроблення нових методів дослідження нанорозмірних плівок ( $\text{EuTiO}_3$ ,  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{DyScO}_3$ , та ін.) для потреб наноприладів НВЧ та спінтроники". Номер держреєстрації 0113U000676 (виконавець);
- "Розробка і дослідження частотно-селективних структур міліметрового діапазону на основі тонких багатомодових діелектричних резонаторів". Номер держреєстрації 0115U000358 (науковий керівник).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвинути теорію композитних матеріалів для створення базису реалізації нових частотно-селективних та фазообертальних пристроїв на основі композитних, напівпровідникових та тонких діелектричних резонансних структур, а також вдосконалення НВЧ методів дослідження діелектричних матеріалів, включаючи тонкі плівки.

Для досягнення вказаної мети необхідно було розв'язати наступні **задачі**:

1. Дослідити вплив складу та структури композитних матеріалів типу діелектрик-метал на їх діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат.
2. Дослідити частотні та температурні залежності електричних властивостей композитних матеріалів у НВЧ діапазоні.
3. Застосувати теорію композитів до розробки частотно-селективних і фазообертальних пристроїв та дослідити вплив структури та складу композитних матеріалів на НВЧ характеристики пристроїв на їх основі.
4. Створити теоретичну базу нового адаптованого до інженерного використання системного підходу до проектування композитних компонентів НВЧ та керованих систем на їх основі.
5. Розробити нову конструкцію актюатора для застосування в техніці НВЧ.
6. Розробити принципи керування частотними характеристиками композитних резонансних структур на основі напівпровідникових та тонких діелектричних

резонаторів і створити нові елементи керованих селективних НВЧ пристроїв на їх основі.

7. Розробити методики вимірювання електрофізичних параметрів діелектричних матеріалів на основі використання багатошарових резонансних діелектричних структур.

*Об'єкт дослідження* – діелектричні та композитні матеріали, а також НВЧ структури і пристрої (в тому числі керуючі і керовані) на основі вказаних матеріалів.

*Предмет дослідження* – електродинамічні властивості і характеристики цих матеріалів, а також структур і пристроїв на їх основі.

**Методика наукових досліджень** включає: методи аналізу і синтезу НВЧ - пристроїв, обчислювальні методи електродинаміки, методи вирішення математичних задач на ЕОМ.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

1. Вперше отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів ефективної діелектричної проникності та ефективного тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу діелектрик-метал, які дозволяють розраховувати температурні властивості таких композитів.
2. Вперше на основі теорії композитних матеріалів розроблено і експериментально підтверджено методику розрахунку характеристик керованих частотно-селективних планарних структур, яка дозволяє прискорити процес проектування керованих частотно-селективних і фазообертаючих пристроїв на їх основі.
3. Удосконалено конструкцію п'єзоперетворювача «cymbal»-типу шляхом заміни суцільної п'єзопластики на дві зустрічні, що дозволило зменшити нелінійність його деформаційної характеристики.
4. Вперше запропоновано новий принципи керування резонансними частотами діелектричних резонаторів шляхом зміни кута повороту резонатора відносно широкої стінки хвилеводу, що дозволило розробити нові конструкції керованих фільтрів та фазообертачів. Точне керування положенням резонатора в даному випадку здійснюється за допомогою крокового двигуна керованого мікропроцесором, що дозволило усунути такий недолік традиційного електромеханічного керування як гістерезис.
5. Вперше запропоновано метод керування характеристиками напівпровідникових планарних частотно-селективних пристроїв НВЧ за рахунок зміни конфігурації провідникових областей оптичним способом, що створює підґрунтя для розроблення принципово нових конструкцій частотно-селективних та фазообертальних пристроїв НВЧ з оптичним керуванням.
6. На основі теорії композитних матеріалів і результатів дослідження тонких діелектричних резонаторів модифіковано метод Крупки для визначення діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат тонких плівок. Запропонований метод дозволяє вимірювати параметри плівкових матеріалів товщиною від десятків нанометрів до кількох мікрометрів.
7. Запропоновано новий метод дослідження властивостей анізотропних матеріалів заснований на використанні досліджуваного зразка у якості тонкого діелектричного резонатора.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що:

1. Виявлені в ході роботи закономірності є підґрунтям для створення на основі композитних структур частотно-селективних та фазообертальних пристроїв НВЧ з електричним та оптичним керуванням, а також частотноселективних покриттів різноманітного призначення на основі решіток тонких діелектричних резонаторів.
2. Розроблені методи аналізу керованих пристроїв НВЧ дозволяють уникнути використання складного математичного апарату електродинаміки за рахунок зведення задачі до раніше розв'язаних шляхом введення ефективних електрофізичних параметрів композитних матеріалів. Запропоновані методи можуть бути застосовані для інженерного розрахунку, а також для отримання початкових наближень при числовому розрахунку з метою прискорення і здешевлення процесу математичного моделювання властивостей керованих пристроїв НВЧ.
3. Розроблені методи вимірювання параметрів НВЧ матеріалів були використані при проведенні наукових досліджень у Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О. Галкіна НАН України та у інституті загальної та неорганічної хімії НАН України, а також можуть бути використані в майбутньому як для подальших наукових досліджень властивостей матеріалів, так і в промисловому виробництві для створення неруйнівних методів контролю технологічних параметрів мікрохвильових пристроїв і компонентів.
4. Запропонована конструкція фільтру на основі відрізків мікросмужкових ліній із ступінчастою неоднорідністю була використана при розробці спецтехніки для співробітників СБУ.
5. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які отримано в роботі, використано при виконанні 9 держбюджетних тем, та застосовано у навчальному процесі, зокрема в лабораторному практикумі з НВЧ електроніки.

**Особистий внесок здобувача.**

В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень, які отримані особисто здобувачем та у спільних роботах з Поплавко Ю.М., Пашковим В.М., Молчановим В.І., Прокопенко Ю.В., Казміренко В.А., Діденко Ю.В., Шмигіним Д.А., Єременко А.В., Мачулянським О.В., Циганком Б.А. та Олійником О.О.

У спільних із співавторами роботах автором було внесено наступний вклад:

- прийнято участь у формуванні основних наукових і технічних ідей [25-29];
- розроблено теоретичні основи досліджень [2, 5, 8, 9, 16, 33, 40, 42, 47];
- проведено необхідні розрахунки [1, 11-15, 18, 19, 28, 33, 38-40, 42-44, 46, 49-51, 60];
- розроблено методика експериментальних досліджень [3-7, 10, 11, 16, 17, 20-26, 30-39, 54-59, 61-70];
- розроблено конструкції досліджуваних макетів [16-21, 27, 29, 45, 49, 60, 67];
- проведено експериментальні дослідження [10, 12-15, 21-24, 29, 34-37, 39, 41, 43, 45, 46, 48-70];
- прийнято участь у інтерпретації отриманих результатів [3, 4, 6, 7, 9, 10, 14, 20, 25, 26, 28, 30-37, 39, 41, 45, 52, 53, 60 ].

Особисто здобувачем зроблено наступне:

- проведено теоретичне та експериментальне дослідження НВЧ характеристик композитних матеріалів полімер-метал, отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів ефективної діелектричної проникності та ефективного тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу діелектрик-метал;
- розроблено методику розрахунку характеристик керованих планарних структур;
- розроблено конструкції керованих селективних пристроїв НВЧ на основі планарних структур;
- розроблено методику вимірювань параметрів діелектричних матеріалів на основі неоднорідного мікросмужкового резонатора;
- проведено теоретичне та експериментальне дослідження тонких діелектричних резонаторів, розроблено конструкції селективних пристроїв НВЧ на їх основі;
- проведено теоретичне та експериментальне дослідження напівпровідникових частотноселективних структур, запропоновано конструкції керованих пристроїв з оптичним керуванням на їх основі;
- проведено експериментальні дослідження, які становлять основу дисертації.

#### **Апробація роботи.**

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри мікроелектроніки національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та конференціях:

- - 36rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2013), Alba Iulia, Romania, 2013;
- - XI Міжнародна науково-технічна конференція ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ – 2010 , Україна, Київ, 2010;
- - VI, VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (COMINFO) (Ялта – Лівадія, Україна, 2010, 2012);
- - 13-та, 20-а та 22-а Міжнародна Кримська конференція «НВЧ–техніка та телекомунікаційні технології» (Севастополь, Україна, 2003, 2010, 2012);
- - 30th, 31st, 32nd, 33rd, 34th, 35th, 36th, 37th, 38th 39th International Science Conference «Electronics and Nanotechnology» (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019;
- - XIII Международная конференция «Физика диэлектриков» (Диэлектрики–2014), Санкт-Петербург, Россия, 2014;
- - 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON–2014), Gdansk, Poland, 2014;
- - IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017), Kyiv, Ukraine, 2017;
- The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017);
- The Twentieth International Workshop on Electromagnetic Non-Destructive Evaluation, ENDE2015, Sendai, Japan, Katahira Sakura Hall, Tohoku University;



- Materials Science & Engineering: Proc. of 5th World Congress – Alicante, 2016;
- E-MRS 2016. Fall Meeting. Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland;
- «Наноструктурные материалы–2016: Беларусь–Россия–Украина» (НАНО–2016);
- Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017): V International research and practice conference, 2017, Chernivtsi, Ukraine;
- Advanced Materials and Technologies: 19-th International Conference-School, 2017, Palanga, Lithuania;
- European Materials Research Society. 2017 Fall Meeting, 2017, Warsaw, Poland;
- IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF–2017), 2017, Lviv, Ukraine.

### **Публікації.**

За результатами досліджень опубліковано 70 наукових праць, у тому числі 24 статті у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародної наукометричної бази Web of Science, 1 у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, 10 у виданнях України включених до міжнародної наукометричної бази Copernicus), 5 патентів на корисну модель, 41 теза доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

### **Структура й об'єм дисертації.**

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 356 сторінок. Робота включає 141 рисунок, 28 таблиць, список використаних джерел з 202 найменувань на 23 сторінках та додатків на 21 сторінці.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**В анотації** у скороченому вигляді наведено основні результати, отримані в роботі, показана їх наукова новизна і практичне значення, а також наведено ключові слова і список публікацій за темою роботи.

**У вступі** на основі аналізу сучасного стану НВЧ електроніки висвітлено актуальність теми роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами, що розроблюються на кафедрі, сформульовано мету та основні завдання роботи, показано методи наукових досліджень, обґрунтовано наукову новизну та практичне отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію представлених результатів, структуру і обсяг роботи.

**У першому розділі** «Керовані мікрохвильові пристрої та НВЧ матеріали» на основі аналізу сучасних тенденцій в галузі НВЧ електроніки показано, що подальший прогрес вимагає нових матеріалів із заданим комплексом властивостей. До нових матеріалів НВЧ висувається ряд вимог, основними з яких є низький рівень діелектричних втрат ( $\text{tg}(\delta) \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ ), широкий діапазон значень діелектричної провідності ( $\epsilon \sim 10 - 10^3$ ), висока температурна стабільність ( $\text{ТК}\epsilon \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ ), механічна міцність, довговічність, стійкість до різноманітних зовнішніх впливів, дешевизна і технологічність виготовлення, можливість автоматизації виробництва, відтворюваність параметрів при масовому виробництві, низька вартість, доступність сировини, екологічна безпечність в процесі виготовлення та експлуатації та інші. Вирішити завдання створення матеріалів з необхідними властивостями можна на

основі використання композитів. Для цього необхідно дослідити залежність властивостей композитів від їх складу.

Важливою характеристикою НВЧ матеріалів є величина діелектричних втрат. Відомо, що діелектричні втрати у НВЧ діапазоні можуть виникати внаслідок наступних причин: електрична провідність ( $\sigma$ ), повільні релаксаційні механізми поляризації спричинені наявністю електронних дефектів, іонних дефектів, різноманітних диполів, які можуть бути описані за допомогою релаксаційної моделі Дебая, одночасна наявність різних видів релаксаторів, що приводить до розмивання діелектричного спектру, яке можна описати моделлю Коул-Коула, наявність швидких резонансних механізмів діелектричної поляризації (оптичної і дальньої інфрачервоної поляризації), які описуються осциляторною моделлю Лорентца. В роботах академіка Білоуса А.Г. та інших авторів показано, що причиною НВЧ втрат може бути пориста структура матеріалу, стан поверхні матеріалу, наявність домішок у матеріалі, наявність дефектів кристалічної структури тощо. В дисертаційній роботі Діденка Ю.В. було показано, що однією з причин НВЧ втрат є наявність високочастотного полярного механізму втрат в нецентросиметричних матеріалах, ангармонізм коливань кристалічної ґратки.

Комбінуючи різні матеріали у композиті можна варіювати їх властивостями, підбираючи компоненти таким чином, щоб підсилити або послабити вплив тих чи інших механізмів. Тому композитні матеріали останнім часом викликають велику зацікавленість з точки зору практичного використання у техніці НВЧ викликають. Властивості таких матеріалів можна змінювати шляхом зміни їх складу, що дозволяє створювати матеріали з унікальними властивостями. Композитні матеріали можна класифікувати за різними ознаками. Так, наприклад, за ознакою функціонального призначення їх можна розділити на конструкційні, магнітні, електропровідні, надпровідні, оптичні, радіопрозорі, радіопоглинаючі тощо. З точки зору використання у техніці НВЧ їх можна розділити за структурно-функціональними ознаками на мікротекстури і макротекстури з подальшим розділом за функціональним призначенням і структурними особливостями, як показано на рис. 1. Така класифікація дозволяє використовувати різні методи розрахунку властивостей композитів в залежності від співвідношення довжини хвилі і розмірів структурних компонентів композиту.

Важливою для НВЧ є також класифікація двохкомпонентних композитів, запропонована Р. Ньюнхемом у 1978 р. Ця класифікація широко застосовується при описі мікрогеометрії композитів та інтерпретації особливостей взаємодії їх компонентів. У основу даної класифікації лежить поняття зв'язності компонентів композиту.

У разі двохкомпонентного композиту, зв'язність кожного компоненту визначається наявністю зв'язку між елементами компонент у трьох напрямках ( $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ). Якщо має місце зв'язок у всіх трьох напрямках, то для даної компоненти він позначається індексом «3», а якщо елементи компоненту пов'язані лише у одному напрямку, то зв'язок позначається цифрою «1». Відсутність зв'язку між компонентами позначається як «0». За умови такого запису двофазний композит характеризується двома числами:  $\alpha$ - $\beta$ . Число  $\alpha$  позначає зв'язність активного

компоненту композиту, наприклад, п'єзоелектрика (у разі п'єзокомпозиту), або піроелектрика (у разі пірокомпозиту). Число  $\beta$  характеризує зв'язність неактивного компоненту (наприклад, полімеру). Виходячи з цієї класифікації можна класифікувати і елементи НВЧ техніки. Так, наприклад, за цією класифікацією можна віднести до групи 2-2 мікросмужкові лінії та пристрої на їх основі, складені діелектричні резонатори тощо.



Рис. 1. Структурно-функціональна класифікація композитних матеріалів НВЧ

Вплив ступеня зв'язності композиту на його властивості можна поділити на три основних ефекти: ефект суми, ефект комбінації і ефект добутку.

**1. Ефект суми.** Якщо композит складається з двох компонент 1 і 2, які мають властивість, що характеризується параметром із значеннями  $Y_1$  та  $Y_2$  відповідно, то у композиті спостерігається проміжне значення даного параметру – між значеннями  $Y_1$  і  $Y_2$ .

**2. Комбінаційний ефект.** Якщо компоненти деякого композиту характеризується двома різними властивостями:  $Y$  і  $Z$ , то у цьому випадку, усереднене значення деякого вихідного параметру, отриманого в композиті, може перевищувати параметри обох компонентів композиту. Це підвищення вихідного параметру залежить від відношення  $Y/Z$  (рис. 2).

**3. Ефект добутку.** Нехай у двокомпонентному композиті є деяка суттєва властивість  $Y$  (відсутня у другому компоненті), а у другому компоненті присутня деяка інша властивість  $Z$  (відсутня у першому компоненті). У цьому випадку можуть виникати абсолютно нові властивості, відсутні в кожному з вихідних компонентів. Вони існують лише в композиті – це ефект добутку.

Врахування вищевказаних ефектів є досить складною задачею. Це стало причиною існування великої кількості вузькоспеціалізованих методів визначення властивостей композитних матеріалів і привело до необхідності узагальнення існуючих підходів до вирішення цієї задачі. На основі аналізу публікацій, результатів розрахунків та експериментальних даних автором роботи для опису властивостей мікротекстурованих НВЧ композитів була обрана формула Ліхтенеккера, а для опису властивостей макротекстурованих НВЧ композитів був обраний ємнісний підхід, які і були покладені в основу всіх подальших теоретичних досліджень. Даний вибір зумовлений такими факторами як достатньо висока

точність розрахунків, простота адаптування до випадку багатокомпонентних композитів та високий ступінь універсальності, що дозволило покласти їх в основу розрахунку досліджуваних нами елементів НВЧ техніки.

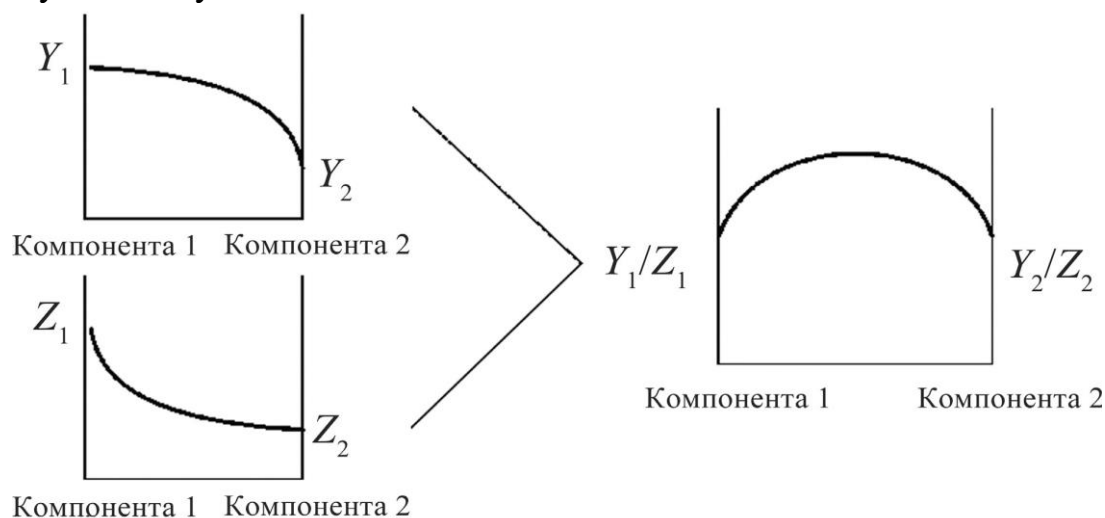


Рис. 2. Комбінаційний ефект у двокомпонентному композиті

У другому розділі «Мікротекстуровані композитні матеріали типу діелектрик-метал» було теоретично досліджено вплив складу та структури композитних матеріалів типу діелектрик-метал на їх діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат, запропоновано і експериментально підтверджено алгоритми розрахунку частотних і температурних залежностей діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу діелектрик-метал у НВЧ діапазоні.

Для дослідження температурних залежностей НВЧ характеристик композитів діелектрик - метал автором було особисто отримано вирази для температурних коефіцієнтів їх діелектричної проникності ( $TK\epsilon_c'$ ) та тангенса кута діелектричних втрат ( $TK \operatorname{tg}(\delta_c)$ ). При виведенні виразів було використано визначення температурних коефіцієнтів діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат, а також формула Ліхтенеккера:

$$TK\epsilon_c^* = \frac{1}{\epsilon_c^*} \frac{d\epsilon_c^*}{dT}, \quad (1)$$

$$TK \operatorname{tg}(\delta) = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} \frac{d \operatorname{tg}(\delta)}{dT},$$

$$\epsilon_c^* = \left( \epsilon_d^* \right)^q \left( \epsilon_m^* \right)^{1-q},$$

де  $q$  - об'ємна доля дисперсної фази в композиті;

$\epsilon_c^*$  - комплексна діелектрична проникність композиту;

$\epsilon_m^*$  - комплексна діелектрична проникність матриці;

$\epsilon_d^*$  - комплексна діелектрична проникність дисперсної фази.

В результаті було отримано наступні вирази:

$$TK\varepsilon'_c = -q \cdot TK\rho + (1-q) \cdot TK\varepsilon'_m, \quad (2)$$

$$TK \operatorname{tg}(\delta_c) = \frac{q \operatorname{tg}(\delta_d)}{\operatorname{tg}(\delta_c)} TK\rho + \frac{(1-q) \operatorname{tg}(\delta_m)}{\operatorname{tg}(\delta_c)} TK \operatorname{tg}(\delta_m), \quad (3)$$

де  $TK\rho$  - температурний коефіцієнт опору металевої дисперсної фази,  $TK\varepsilon'_m$  і  $TK \operatorname{tg}(\delta_m)$  - температурні коефіцієнти діелектричної провідності та тангенса кута діелектричних втрат діелектричної матриці відповідно.

Для перевірки отриманих залежностей було проведено експериментальне дослідження температурних залежностей діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат матеріалів типу діелектрик-метал у НВЧ-діапазоні. Експериментальні дослідження були проведені в діапазоні частот 8–60 ГГц. Товщина зразків складала 2 мм. В якості матеріалу матриці була використана епоксидна смола ( $\varepsilon = 2,73 - j0,2$  на частоті 10 ГГц). В якості наповнювача було використано порошки алюмінію, міді, никеля та вуглецю. Діелектричні проникності були визначені методом відбиття-проходження. Вимірювання коефіцієнтів відбиття ( $S_{11}$ ) і передачі ( $S_{21}$ ) електромагнітної енергії НВЧ випромінювання проводилось з використанням панорамного вимірювача (рис. 3). Результати вимірювання представлені на рис 4.

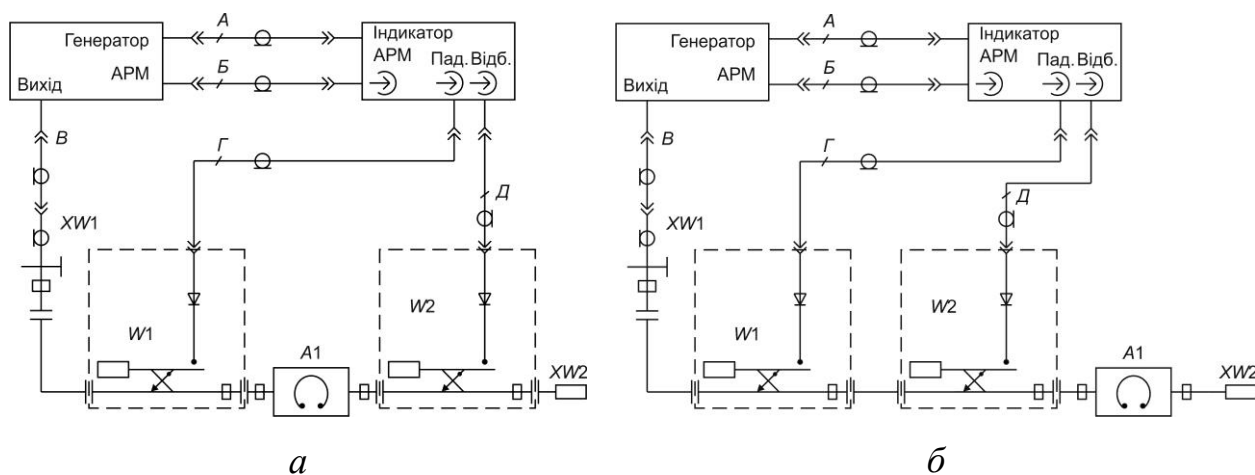


Рис. 3. Блок-схема підключення панорамного вимірювача при вимірюванні параметра  $S_{21}$  (а) та  $S_{11}$  (б):  $XW1$  – коаксіальний кабель,  $W1$  – напрямлений відгалуджувач падаючої хвилі,  $W2$  – напрямлений відгалуджувач відбитої хвилі,  $A1$  – вимірювальна хвильоводна секція із зразком,  $XW2$  – узгоджене навантаження

Також на базі виразів 2-3 було проведено числовий розрахунок температурних властивостей двохшарових покриттів епоксид-композит (епоксид-алюміній з об'ємною долею алюмінію  $q=0,35$ ) та їх експериментальне дослідження. Результати представлено на рис. 5.

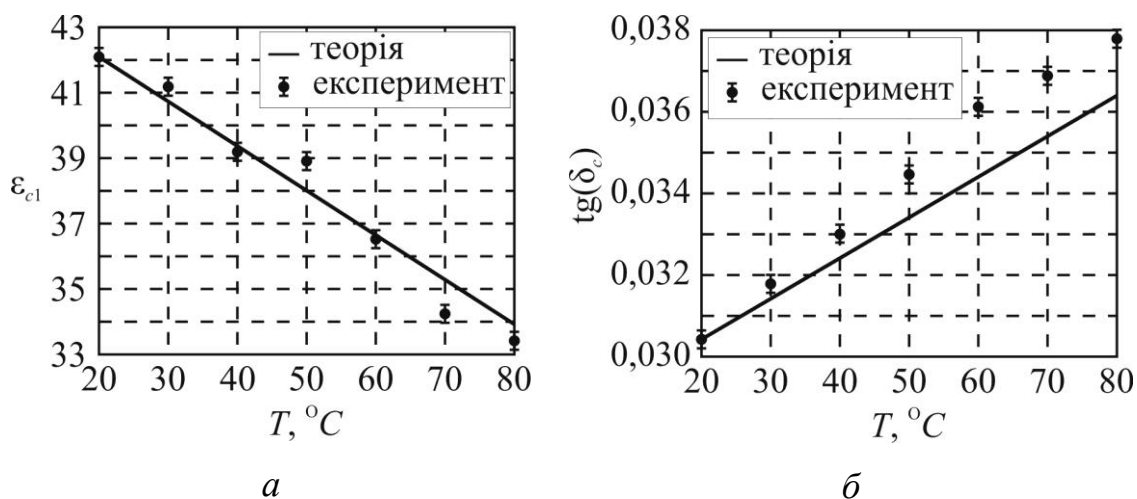


Рис. 4. Температурна залежність діелектричної проникності (а) та тангенса кута діелектричних втрат (б) композиту епоксид- алюміній

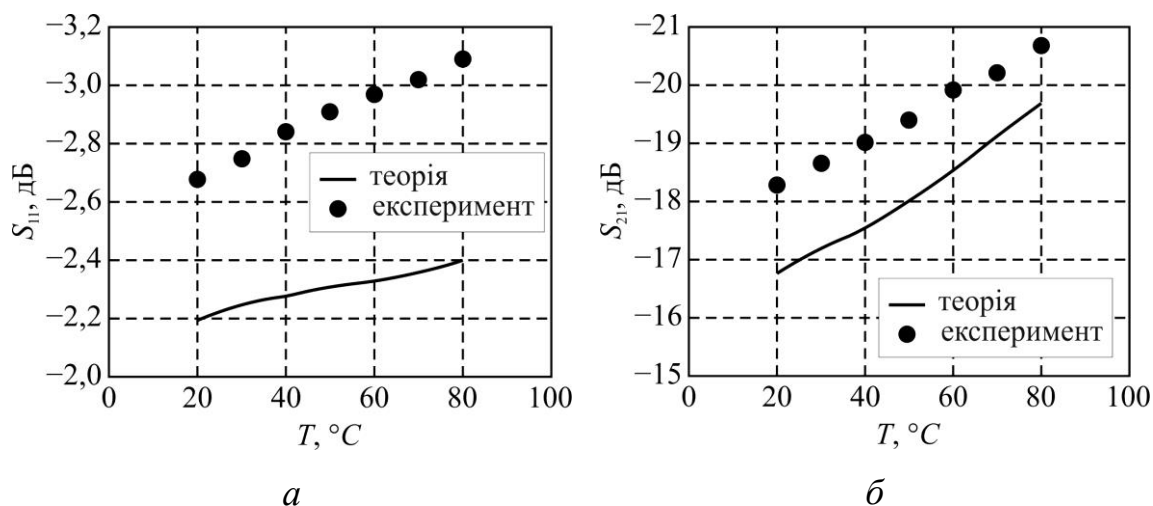


Рис. 5. Результати розрахунку та експериментального дослідження температурної залежності параметрів  $S_{11}$  та  $S_{21}$  (б) двошарового покриття епоксид-композит (епоксид-алюміній з об'ємною долею алюмінію  $q=0,35$ )

У третьому розділі «Планарні керовані частотnoseлективні структури НВЧ» розглянуто методи керування характеристиками керованих частотnoseлективних пристроїв НВЧ, запропоновано конструкції керованих частотnoseлективних пристроїв НВЧ на основі відрізків неоднорідних мікрострічкових ліній з електромеханічним та оптичним керуванням, сформульовано вимоги до електромеханічних актюаторів для НВЧ використання, а також запропоновано удосконалені конструкції електромеханічних актюаторів.

Як уже відмічалось досить перспективним шляхом створення керованих резонансних пристроїв НВЧ є використання композитних макротекстур (в тому числі керованих мікрострічкових ліній), в яких, окрім основної області, існують також області сторонніх включень у вигляді пластин, повітряних зазорів и т.і., які спотворюють електромагнітне і можуть суттєво впливати на НВЧ параметри

макротекстур. За результатами попередніх досліджень було виявлено, що найбільш ефективними, з точки зору впливу на характеристики резонансної системи, є включення, які реалізують ступінчасту зміну діелектричної та/або магнітної проникності у напрямі перпендикулярному до ліній електричного та магнітного поля відповідно, що і лягло в основу розробки у даній роботі керованих макротекстурованих композитних резонансних систем, а також методів вимірювання НВЧ характеристик матеріалів. Розрахунок параметрів таких систем зазвичай зводиться до числового розв'язку системи рівнянь Максвелла, хвильових рівнянь або рівнянь Гельмгольца за заданих умов на межах розділу областей. Даний метод є досить точним і ефективним, особливо на фоні бурхливого розвитку обчислювальної техніки. Однак існує ряд проблем.

По-перше не завжди можна точно сформулювати умови на межах. По-друге навіть, якщо умови сформульовано – не завжди вдається реалізувати їх технологічно при виготовленні пристроїв НВЧ. По-третє точний розрахунок вимагає високої кваліфікації розробників, великих затрат обчислювальних ресурсів і часу, що відповідно призводить до великих матеріальних затрат при розробці керованих частотно-селективних пристроїв на основі макротекстур. Однак у багатьох випадках побутового використання нема потреби у високій точності розрахунку, що робить економічно недоцільним точний розрахунок. Вирішити дану проблему дозволяє використання ефективних параметрів (ефективної діелектричної проникності, ефективних втрат тощо). Виходячи з цього автором роботи було запропоновано адаптовану до інженерних потреб методику розрахунку, засновану на квазістатичному наближенні (4).

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{еф}}}} \frac{1}{\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1,4444\right)}; \\
 \epsilon_{\text{еф}} &= \frac{\epsilon_{\text{деф}} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{\text{деф}} - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}; \text{ при } \frac{W}{h} \geq 1. \\
 Z_0 &= \left( \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{еф}}}} \right) \ln\left( \frac{8h}{W} + 0,25 \frac{W}{h} \right), \\
 \epsilon_{\text{еф}} &= \frac{\epsilon_{\text{деф}} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{\text{деф}} - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} + 0,041 \left( 1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right), \text{ при } \frac{W}{h} < 1,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де  $W$  – ширина металічного електроду,  $h$  – товщина підкладенки (включаючи ширину повітряного зазору).

Для адаптації цієї методики до розрахунку керованих пристроїв на основі мікросмужкових ліній (рис. 6) діелектрична проникність підкладки  $\epsilon_d$  була замінена на ефективну діелектричну проникність композиту підкладка - повітряний зазор  $\epsilon_{\text{деф}}$ , для розрахунку якої був використаний ємнісний підхід  $\epsilon_{\text{деф}}^x = q_d \epsilon_d^x + q_z \epsilon_z^x$ , де  $q_d$  та  $q_z$  – об’ємні частки діелектрика підкладки і повітряного зазору відповідно ( $q_d + q_z = 1$ ),  $\epsilon_z = 1$  – діелектрична проникність повітряного зазору, а  $x$  – параметр, який визначає розподіл компонентів, приймає значення (-1) для системи послідовних шарів матеріалу (відносно ліній напруженості електричного поля) і (+1) для системи паралельних шарів матеріалу (рис. 7).

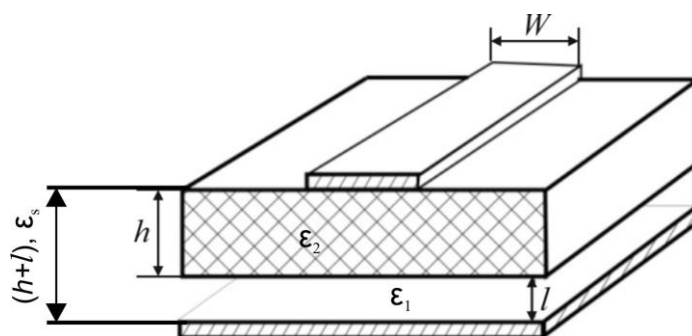


Рис. 6. Керована мікросмужкова лінія з повітряним зазором

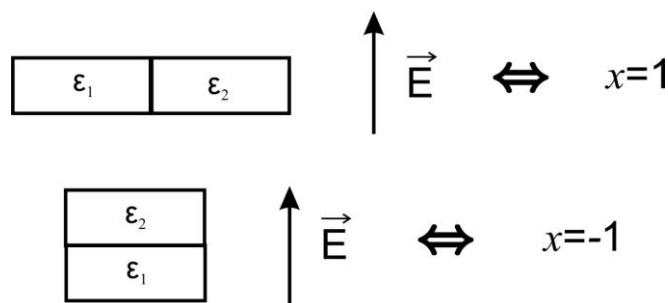


Рис. 7. Визначення значення параметру  $x$

Для перевірки даного підходу було проведено розрахунок ряду мікросмужкових резонаторів. Результати розрахунку для структури зображеної на рис. 6 наведено на рис. 8.

Для оцінки точності запропонованого методу (ЗМ) в таблицях 1-3 наведено результати розрахунку за описаною методикою та методом скінчених елементів (МСЕ) запропонованим Прокопенко Ю.В.

У таблиці 4 наведено результати експерименту та розрахунку для керованої мікрострічкової структури, зображеної на рис. 9.



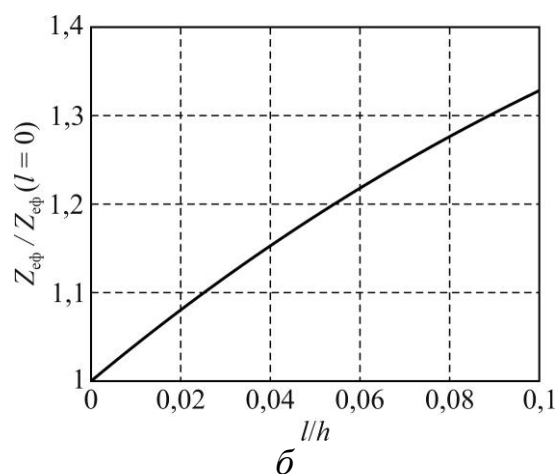
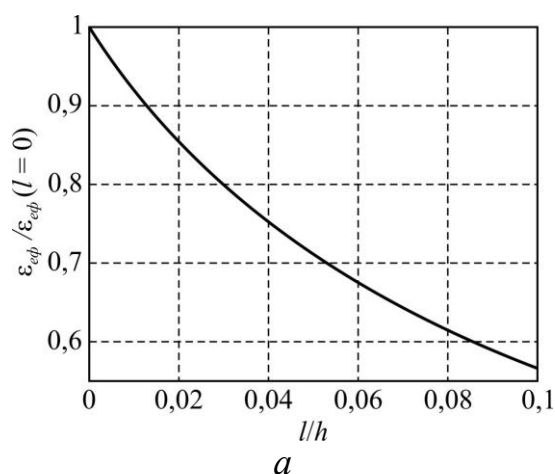


Рис. 8. Залежність нормованої ефективної діелектричної проникності (а) та нормованого хвильового опору (б) структури від відношення ширини зазору до товщини підкладки

Таблиця 1.

Значення нормованого хвильового опору розраховані запропонованим методом та методом скінчених елементів для  $W/h=0,2$ ,  $\epsilon_d=10$  за різних значень відношення зазору до товщини підкладки ( $l/h$ ).

$l/h=0.02$			$l/h=0.06$			$l/h=0.1$		
ЗМ	МСЕ	різниця, %	ЗМ	МСЕ	різниця, %	ЗМ	МСЕ	різниця, %
1,075	1,1	2,5	1,23	1,35	8,9	1,36	1,52	10,5

Таблиця 2.

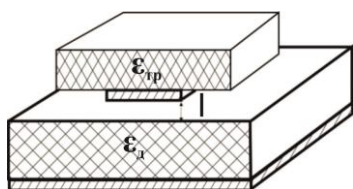
Значення нормованого хвильового опору розраховані запропонованим методом та методом скінчених елементів для  $W/h=2$ ,  $\epsilon_d=10$  за різних значень відношення зазору до товщини підкладки ( $l/h$ ).

$l/h=0.02$			$l/h=0.06$			$l/h=0.1$		
ЗМ	МСЕ	різниця, %	ЗМ	МСЕ	різниця, %	ЗМ	МСЕ	різниця, %
1,10	1,05	-0,48	1,26	1,15	-9,56	1,32	1,22	-8,20

Таблиця 3.

Значення нормованого хвильового опору розраховані запропонованим методом та методом скінчених елементів для  $W/h=1$ ,  $l/h=0.1$  за різних значень діелектричної проникності.

$\epsilon_d$	ЗМ	МСЕ	$\delta$ , %
4	1,16	1,12	-3,60
6	1,18	1,17	-0,85
8	1,32	1,22	-8,20
10	1,38	1,30	-6,15
20	1,7	1,8	5,60



$l=0 \dots 144 \text{ мкм}$   
 $W=3 \text{ мм}$   
 $h=1,6 \text{ мм}$   
 $\varepsilon_d=4,3$

Рис. 9. Досліджувана керована мікострічкова структура

Таблиця 4

Розраховані та експериментальні значення нормованої ефективної діелектричної проникності ( $\varepsilon_n$ ) для конструкції рис. 9.

$\varepsilon_{tp}=10$															
$l/h$	0			0,025			0,050			0,062			0,082		
	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$
$\varepsilon_n$	1	1	0	0,92	0,92	0	0,87	0,86	-1,2	0,84	0,8	-5,0	0,79	0,71	-11,3
$\varepsilon_{tp}=2$															
$l/h$	0			0,025			0,050			0,062			0,082		
	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$	p	e	$\delta, \%$
$\varepsilon_n$	1	1	0	0,89	0,89	0	0,83	0,82	-1,2	0,82	0,78	-5,1	0,76	0,65	-16,9

З наведених даних видно, що запропонований метод розрахунку має достатню для практичного використання точність.

Для перевірки даної методики було реалізовано і експериментально досліджено макет дворезонаторного фільтру з електромеханічним керуванням на основі відрізків неоднорідних мікросмужкових ліній рис. 10.

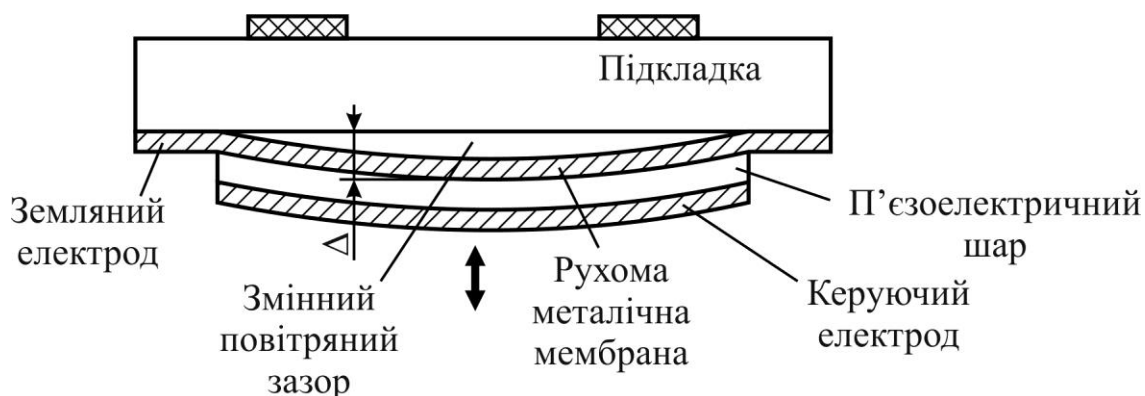


Рис. 10. Схематичне зображення мікросмужкового дворезонаторного фільтру з електромеханічним керуванням

Характеристики досліджуваного макету фільтру, а саме коефіцієнт передачі та фазова характеристика, наведені на рис. 11.

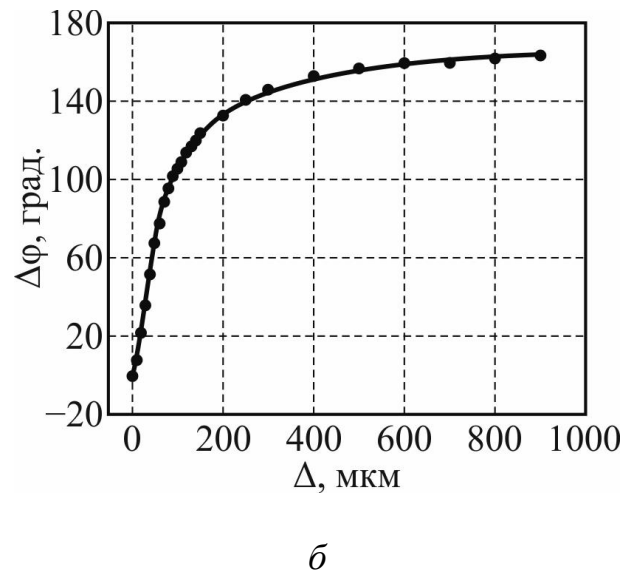
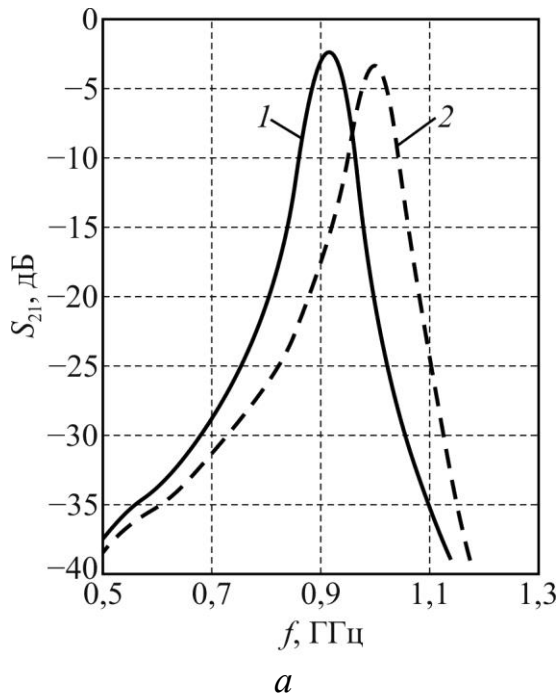


Рис. 11. Частотна залежність коефіцієнта передачі мікросмужкового дворезонаторного фільтру з електромеханічним керуванням (а) при значеннях зазору між підкладкою та земляним електродом 10 мкм (1) і 100 мкм (2) та фазова характеристика (б)

Останнім часом велику зацікавленість викликають системи з оптичним керуванням характеристиками. Це спричинено тим, що такі системи мають меншу інерційність ніж електромеханічні, у них відсутнє явище гістерезису і вони добре узгоджуються з оптичними інформаційними мережами.

Автором роботи у співавторстві з Циганком Б.А. та Олійником О.О. було проведено дослідження можливості реалізації оптично керованих планарних частотоселективних пристроїв, принцип дії яких ґрунтується на зміні конфігурації провідникових областей мікросмужкової лінії оптичним методом. Нами було проведено експериментальне дослідження можливості формування оптичним методом на поверхні напівпровідникової підкладки провідникових доріжок, здатних до передачі по них електричних сигналів. Схема експерименту представлена на рис. 12.

У дослідах були використані полікристалічні підкладки, виготовлені з CdS і CdTe, поверхні яких освітлювалися зеленим і червоним лазером відповідно. По оптично сформованих провідникових доріжках вдалося пропустити сигнал частотою до 15 МГц. При більш високій частоті відбувалося сильне спотворення сигналу, що викликано на наш погляд низькою рухливістю носіїв в CdS і CdTe. Є підстави вважати, що при використанні підкладки з GaAs і інфрачервоного лазера можна передавати сигнали значно більшої частоти.

Отримані результати захищені патентом України на корисну модель. Патент на корисну модель Пат. №101015 Україна МПК H03K 17/28 (2006.01), H03K 17/78 (2006.01). Пристрій підвищення щільності міжз'єднань електронних компонентів у

мікросхемах [Текст] Циганок Б. А., Власюк А. В., Олійник О. О., Татарчук Д. Д., Пацьора І. В. .; заявник і власник НТУУ «КПІ». — №u201500908 ; заявл. 05.02.2015 ; опубл. 25.08.2015. – 4 с.

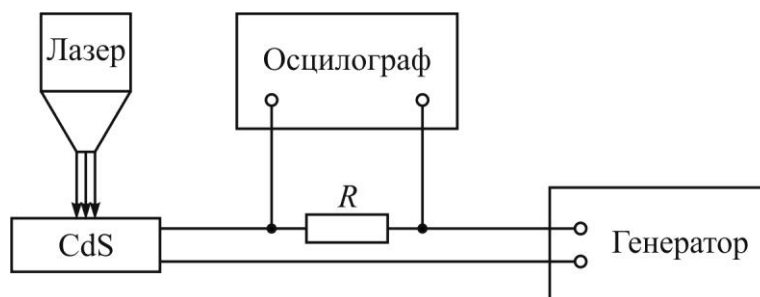


Рис. 12. Схематичне зображення дослідної установки для формування оптичним методом провідникових доріжок на поверхні напівпровідника

Для вирішення поставлених у рамках даної роботи задач необхідно було дослідити можливість зміни параметрів елементу мікросмужкового тракту без суттєвого зменшення його добротності за рахунок зміни його конфігурації оптичним методом. Попередньо було проведено вимірювання власної добротності ДР виготовлених з високоомного арсеніду галію. Всі досліджувані зразки продемонстрували високу добротність, що добре узгоджується з літературними даними по НВЧ властивостях арсеніду галію. За кімнатної температури GaAs резонатори у НВЧ діапазоні мали наступні параметри діелектрична проникність (13,0), добротність 4900...5000 ( $f \approx 8...30$  ГГц). Базуючись на результатах попередніх досліджень у якості підкладки для даного елементу було вирішено використати високоомний арсенід галію. З GaAs було виготовлено підкладку розміром 20x10x0.4 мм, на якій було сформовано мікросмужкову 50-омна лінія. Дана лінія електрично з'єднувалась з базовою 50-омною мікросмужковою лінією таким чином, щоб отримати одно резонаторний полюсозатримуючий фільтр (рис. 13).

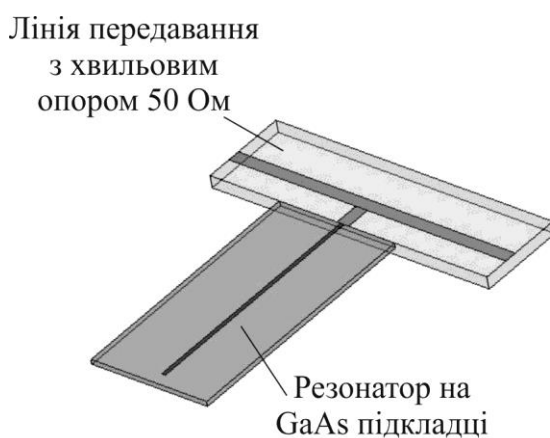


Рис. 13. Схематичне зображення макету однорезонаторного полюсозатримуючого фільтра з оптичним керуванням частотою

Дослідження виконані за допомогою панорамного вимірювача у діапазоні 3 – 6 ГГц. Резонансна частота фільтру становила 3,43 ГГц. Добротність резонансного відрізка на GaAs при освітленні складала  $Q_0 = 240$ . Освітлюючи напівпровідник біля металевої смужки, змінювали конфігурацію провідникової області за рахунок ефекту фотопровідності. Таким чином вдалося за рахунок освітлення зменшити резонансну частоту фільтру на 2%, що дає підстави вважати можливим створення планарних напівпровідникових частотоселективних пристроїв НВЧ з оптичним керуванням частотою.

У багатьох областях науки і техніки існує проблема здійснення точних електричнокерованих макро- і мікропереміщень. Це необхідно при юстуванні оптичних приладів, прецизійних дозаторів, в напівпровідниковому виробництві – для точного поєднання об'єктів і т.д.

Найчастіше для таких цілей використовують п'єзоелектричні і електрострикційні приводи (актюатори). Залежно від конструкції вони забезпечують переміщення від часток мікрона до сотень мікрон. Збільшення розміру переміщень неминуче пов'язане з ростом довжини актюатора, тому актюатори для великих переміщень мають довжину кілька десятків сантиметрів, що є неприйнятним для НВЧ мікроелектроніки, тому проблема розробки електромеханічних приводів для НВЧ пристроїв є досить гострою.

Відомі наразі макетні розробки електромеханічних керованих НВЧ фільтрів, фазообертачів та інших НВЧ пристроїв за такими показниками як габарити, швидкодія, вібростійкість, значення керуючої напруги – мало задовольняють вимогам мікроелектроніки НВЧ.

Проведені автором дослідження по розробці конструкцій електромеханічних керованих пристроїв НВЧ, дозволили сформулювати вимоги до актюаторів НВЧ використань. Крім основних вимог, таких як - висока точність позиціонування, вібростійкість, термостабільність тощо актюатори для НВЧ повинні відповідати наступним вимогам:

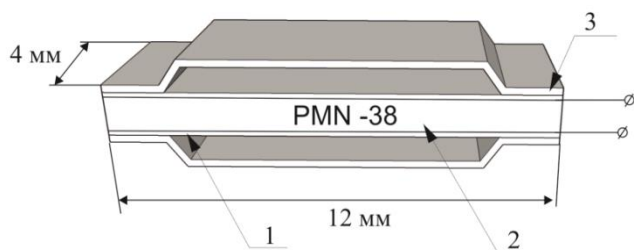
1. Форма і конструкція актюатора повинні узгоджуватись з конструкцією конкретного НВЧ пристрою. Особливо це стосується планарних конструкцій, коли актюатор працює безпосередньо в полі НВЧ.

2. Актюатор повинен забезпечити переміщення до 150 мкм при керуючій напрузі не більше 60 В.

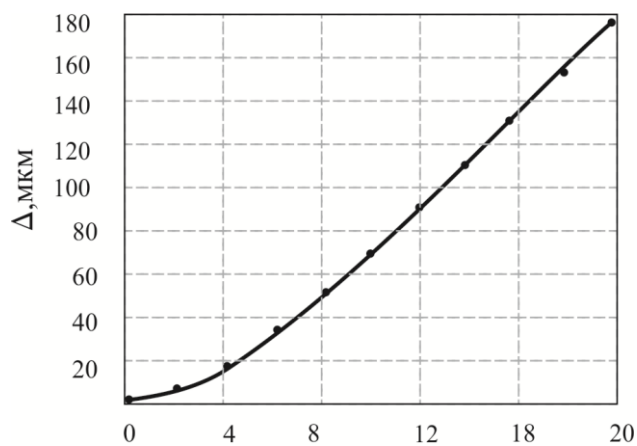
3. Вартість актюатора повинна бути порівнянною з вартістю інших компонентів, на основі яких створюється керований пристрій НВЧ.

На основі сформульованих вимог було запропоновано модифікований варіанту актюатора "cymbal" типу (рис. 14, а), який представляє собою прямокутну пластину з PZT або PMN кераміки з електродами, на яких зафіксовані металеві накладки. Це дозволило покращити ряд характеристик актюатора (розміри, величини переміщення, швидкість роботи) за неістотної втрати тягового зусилля.

Даний зразок забезпечив переміщення до 200 мкм. У вільному стані на початку деформаційної кривої має місце нелінійність, характерна для електрострикційних матеріалів (14, б).



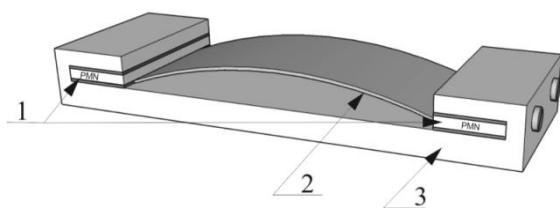
*a*



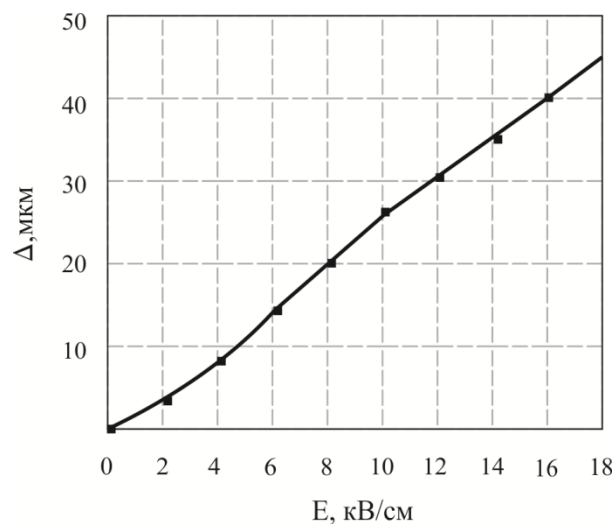
*б*

Рис. 14. Модифікований варіант актюатора "cymbal" - типу на суцільній пластині з електрострикційного матеріалу PMN-38 (*a*) і його деформаційна характеристика (*б*): 1 – електроди, 2 – кераміка PMT- 38 / PT, 3 – металеві накладки

За результатами експериментальних досліджень та з врахуванням того, що для реальних конструкцій достатнім є переміщення 150 мкм, був розроблений інший зразок актюатора (рис. 15, *a*). В даному зразку було замінено суцільну п'єзопластину на дві із зустрічним напрямом деформації, що дозволило покращити лінійність деформаційної характеристики на початку деформаційної кривої. Деформаційну характеристику даного зразка наведено на рис. 15, *б*. Крім того у розроблений конструкції металева мембрана має початкове напруження, що підвищує її жорсткість і вібростійкість.



*a*



*б*

Рис. 15. Актюатор на основі двох електрострикційних пластин із зустрічним напрямом деформації (*a*) та його деформаційна характеристика (*б*): 1 - кераміка PMT- 38/PT, 2 - бронзова мембрана, 3 - металічна основа

У четвертому розділі «Керовані частотоселективні пристрої на основі тонкого діелектричного резонатора» досліджено властивості тонких діелектричних резонаторів, виявлено їх особливості та запропоновано конструкції частотоселективних пристроїв з електромеханічним керуванням на їх основі.

Наразі частотний ресурс сантиметрового та дециметрового діапазонів практично вичерпаний, тому постала необхідність освоєння міліметрової області НВЧ-діапазону. Для цього необхідно розробити ряд комунікаційних пристроїв, здатних працювати у даному діапазоні. При цьому раціональним є бажання використовувати добре відомі, відпрацьовані рішення.

У сантиметровому і дециметровому діапазонах довжин хвиль натепер широко застосовують діелектричні резонатори. Але при спробах їх використання у міліметровому діапазоні виникає цілий ряд ускладнень. Основною проблемою при цьому є дуже малі розміри діелектричних резонаторів, що ускладнює налагодження пристроїв на їх основі.

Проведені нами дослідження показали, що проблему можна вирішити використовуючи тонкі діелектричні резонатори (з відношенням товщини до поперечних розмірів менше 0,4), оскільки їх поперечні розміри більші ніж у традиційних резонаторів розрахованих на таку ж частоту.

Крім того тонкі діелектричні резонатори мають ряд особливостей, які розширюють їх функціональні можливості порівняно із традиційними. Так, наприклад, було виявлено залежність їх резонансної частоти (рис. 16, 17) та фази сигналу (рис. 18) від кута між площиною резонатора і широкою стінкою хвилеводу.

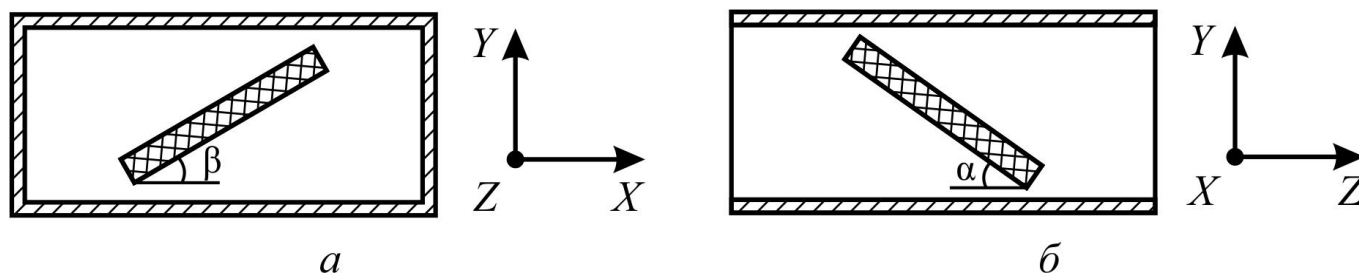


Рис. 16. Розміщення досліджуваного резонатора у хвилеводі. Напрямок осі Z співпадає з напрямом розповсюдження електромагнітної хвилі у хвилеводі

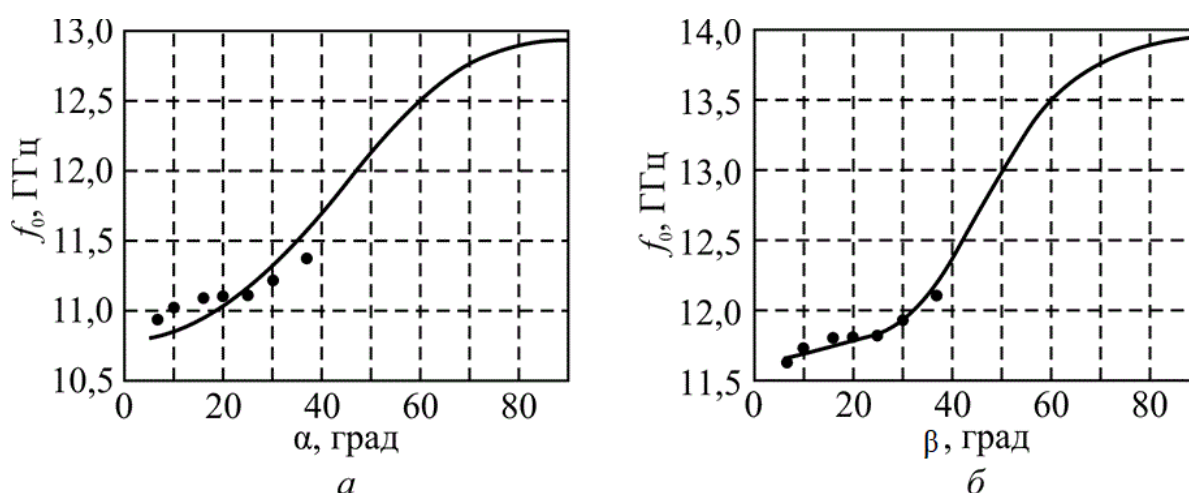


Рис. 17. Залежність резонансної частоти нижчої HE-моди від кута повороту резонатора в площині XOZ: а – квадратний резонатор ( $\epsilon = 35$ ,  $a = 9,9$  мм,  $b = 9,9$  мм,  $L = 2,48$  мм), б – циліндричний резонатор ( $\epsilon = 35$ ,  $D = 12,8$  мм,  $L = 0,63$  мм)

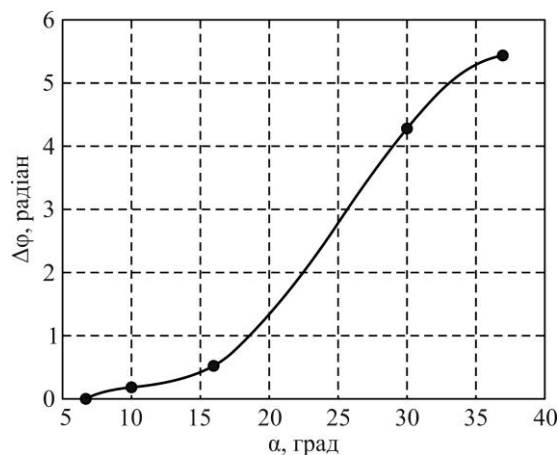


Рис. 18. Залежність зсуву фаз фазообертача відбивного типу на основі надтонкого циліндричного резонатора ( $D = 12,81$  мм, висота  $L = 0,63$  мм,  $\epsilon=35$ ) від кута нахилу резонатора  $\alpha$  (на частоті 11,9 ГГц)

Дана залежність може бути використана для створення керованих фільтрів та фазообертачів на основі тонких діелектричних резонаторів з електричним керуванням. На основі отриманих результатів була запропонована конструкція резонансної комірки з електромеханічним управлінням резонансною частотою і фазою сигналу шляхом зміни кута повороту тонкого діелектричного резонатора. На дану конструкцію оформлений патент на корисну модель. Пат. 116158 Україна, МПК (2016.01) H01P 1/18, H01P 1/207. Керована надвисокочастотна система на основі тонкого діелектричного резонатора / Д. Д. Татарчук, В. І. Молчанов, Ю. М. Поплавко, Ю. В. Діденко, А. С. Франчук ; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u 2016 11812 ; заявл. 22.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.

Точне керування положенням резонатора в даному випадку можна здійснювати за допомогою крокового двигуна керованого мікропроцесором. При використанні даного способу відсутній такий недолік традиційного електромеханічного керування як гістерезис.

**У п'ятому розділі «Застосування макротекстурованих композитних структур для дослідження НВЧ матеріалів»** розглянуто використання макротекстурованих структур для вимірювання мікрохвильових характеристик матеріалів. Запропоновано методи вимірювання на основі композитної мікросмужкової лінії та на основі тонкого діелектричного резонатора.

Наразі, існує велика кількість різноманітних методів дослідження характеристик діелектричних матеріалів НВЧ діапазону. Однак, проблему дослідження НВЧ характеристик діелектричних матеріалів не можна вважати повністю вирішеною, оскільки усі відомі методи мають ряд недоліків і переваг, які визначають їх межі застосування. Не існує жодного методу, який би був досить універсальним і не мав би жодних обмежень у використанні.

Одним з перспективних методів вимірювання НВЧ параметрів матеріалів може стати метод неоднорідного мікросмужкового резонатора. Метод неоднорідного мікросмужкового резонатора відноситься до групи резонансних



методів вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів. Дана група методів характеризується високою точністю та базується на вимірюванні резонансної частоти і добротності системи, яка містить досліджуваний зразок. Для реалізації методу неоднорідного мікросмужкового резонатора нами було розроблено і виготовлено комірку (рис. 19), яка представляє собою смугозагороджуючий фільтр на основі мікросмужкового резонатора.

Вимірювальна комірка на основі композитного мікросмужкового резонатора, конструкція якої схематично представлена на рис. 19, під'єднується до панорамного вимірювача і функціонує наступним чином. Сигнальний електрод 2 вимірювальної комірки за допомогою коаксіальних рознімачів 3 з'єднують з панорамним вимірювачем, досліджуваний зразок 4 розміщують між підкладкою 1 і металевим заземленим електродом 5. Досліджуваний зразок 4 змінює комплексний опір вимірювальної комірки. Це спричиняє зміну резонансної частоти і добротності комірки. Діелектричну проникність зразка розраховують за величиною змінювання частоти, а фактор втрат зразка за величиною змінювання добротності.

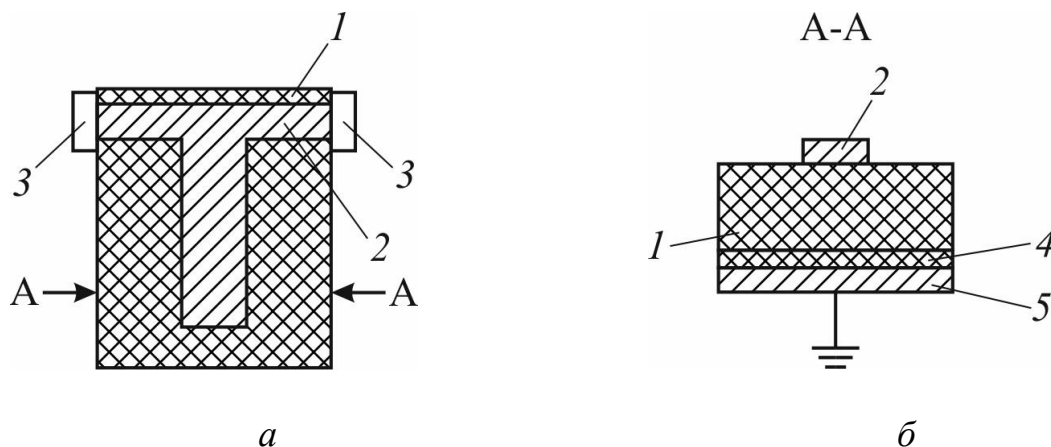


Рис. 19. Вимірювальна комірка на основі мікросмужкового резонатора вид зверху (а), та вид спереду (б): 1 – діелектрична підкладка, 2 – сигнальний електрод, 3 – коаксіальні рознімачі, 4 – досліджуваний зразок, 5 – заземлений електрод

Даний метод захищений патентом України на корисну модель. 5. Пат. 136582 Україна, МПК(2019.01) G01R 27/04, G01R 27/26. Мікросмужкова комірка для визначення діелектричної проникності та фактору втрат матеріалів на надвисоких частотах / Д. Д. Татарчук, Ю. В. Діденко, Ю. М. Поплавко ; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – № у 2019 02285 ; заявл. 06.03.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. – 4 с.

Запропонована конструкція композитної мікросмужкової комірки для визначення діелектричної проникності та фактору втрат матеріалів на надвисоких частотах дозволяє вимірювати параметри листових та плівкових зразків. У таблиці 5 наведено результати вимірювання НВЧ параметри керамічних діелектриків та довідкові дані для тих же матеріалів.

Таблиця 5.

Результати визначення діелектричної проникності діелектричних матеріалів методом неоднорідного мікросмужкового резонатора ( $h = 1 \text{ мм}$ ,  $\epsilon_n = 9,8$ )

Матеріал	Товщина матеріалу, мм	$\epsilon$ (довідникові дані)	$\epsilon$ (виміряне значення)
Силіконова резина	1	2	2,02
Поліетилен	0,05	2,2	2,0
Полікор	0.5	9,9	9,7

Ще одним перспективним методом може стати метод тонкого діелектричного резонатора. Цей метод належить до групи методів складеного діелектричного резонатора. Дана група методів базується на вимірюванні ефективної діелектричної проникності та ефективного тангенса кута діелектричних втрат резонатора, який складається з опорного матеріалу з відомими характеристиками та досліджуваного матеріалу. На основі отриманих результатів розраховують значення шуканих характеристик досліджуваного матеріалу.

Базовий і досліджуваний матеріали можуть розміщуватись у вигляді паралельних або послідовних шарів матеріалу (відносно напрямку вектора електричного поля див. рис. 7).

Використання тонкого діелектричного резонатора в якості опорного дозволяє модифікувати метод Крупки для дослідження НВЧ властивостей тонких плівок. Для розрахунку можна використовувати відомий з теорії композитів вираз  $\epsilon^x = q_1 \epsilon_1^x + q_2 \epsilon_2^x$  де  $\epsilon$ ,  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  – діелектричні проникності компонентів структури,  $q_1$ ,  $q_2$  – об'ємні концентрації компонентів, що задовольняють умові  $q_1 + q_2 = 1$ ,  $x$  - приймає значення -1 (для послідовних шарів матеріалу) і +1 (для паралельних шарів матеріалу).

Запропонованим методом було досліджені плівки  $\text{EuTiO}_3$  завтовшки 22 нанометра, нанесені на підкладку розміром  $10 \times 10 \times 0.248 \text{ мм}^3$ .

Вимірювання виконані у циліндричній вимірювальній комірці з використанням  $\text{TE}_{018}$  моди. Результати вимірювання наведені на рис. 20.

Отримані результати збіглися з результатами, одержаними за допомогою іншого методу для плівок товщиною 500 і 700 нм, що свідчить про достатню точність методу.

Крім того даним методом було проведено дослідження діелектричних властивостей ряду матеріалів в рамках співробітництва з Донецьким фізико-технічним інститутом ім. О.О. Галкіна НАН України. Частина отриманих результатів представлена у таблицях 6-8.

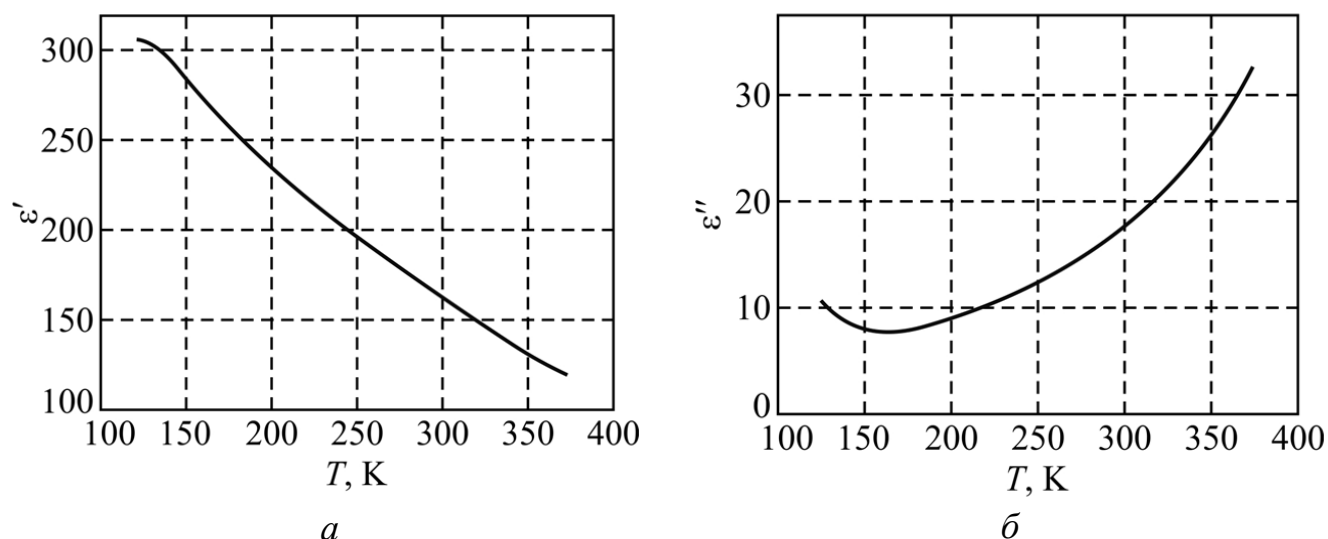


Рис. 20. Температурні залежності діелектричної проникності (а) та фактору втрат (б) плівки EuTiO<sub>3</sub> (товщина 22 нм)

Таблиця. 6.

Результати визначення діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат матеріалів типу Bi<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> методом тонкого діелектричного резонатора

Склад матеріалу $x$	Розміри зразка		$\epsilon$	$\text{tg}(\delta)$
	діаметр, мм	висота, мм		
0,10	7,95	1,50	7,54	0,00082
0,15	7,96	1,57	6,90	0,00083
0,20	7,74	1,58	6,55	0,00110

Таблиця. 7.

Результати визначення діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат матеріалів типу La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3-x</sub>K<sub>x</sub>Mn<sub>1+x</sub>O<sub>3</sub> методом тонкого діелектричного резонатора

Склад матеріалу $x$	$\epsilon$	$\text{tg}(\delta)$
0,00	7,4	0,00009
0,05	7,6	0,00018
0,10	10,1	0,00033
0,20	11,1	0,00450
0,30	13,9	0,00720

Таблиця. 8.

Результати визначення діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат матеріалів типу  $\text{La}_{1.0-x}\text{Mn}_{1.0+x}\text{O}_3$  методом тонкого діелектричного резонатора

Склад матеріалу $x$	Розміри зразка		$\varepsilon$	$\text{tg}(\delta)$
	діаметр, мм	висота, мм		
0	7,91	2,23	6,98	0,0099
0,1	7,79	2,25	7,7	0,0028
0,2	7,75	2,15	7,8	0,0027
0,3	7,89	2,20	9,9	0,0033
0,4	7,85	2,16	11,6	0,0028

В процесі дослідження було виявлено, що чутливість методу суттєво залежить від товщини базового тонкого діелектричного резонатора. На рис. 21 показано залежність чутливості методу від товщини базового резонатора для опорного резонатора з діелектричною проникністю 10 при товщині досліджуваної плівки 20 нм і діелектричній проникності плівки 200.

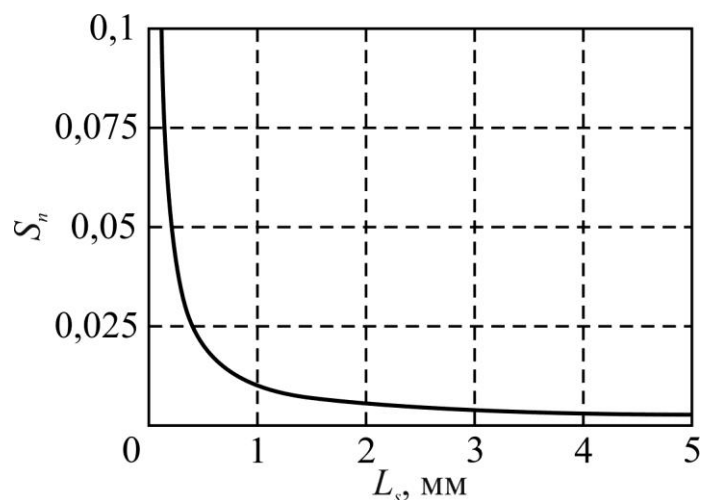


Рис. 21. Залежність чутливості методу тонкого резонатора від товщини опорного резонатора; діелектрична проникність опорного резонатора становить 10, товщина плівки – 20 нм

Аналітично чутливість методу можна описати виразом:

$$S_n = A \frac{\Delta F}{F} \frac{L_f}{L_s}, \quad (5)$$

де  $A$  – константа, яка характеризує співвідношення діелектричних проникностей плівки та резонатора,  $L_s$  – товщина резонатора,  $L_f$  – товщина плівки.

Цікавим також є використання гібридної HE- моди тонкого діелектричного резонатора для дослідження анізотропії діелектричної проникності матеріалів. Річ у тім, що у разі анізотропії діелектричної проникності фазові швидкості у різних напрямках відмінні. В цьому випадку спостерігаємо два близьких резонансних піка HE:  $HE_{11\delta-\perp}$  та  $HE_{11\delta-\parallel}$ . Із збільшенням коефіцієнта анізотропії відстань між HE-резонансами зростає (рис. 22).

Для діелектриків з одноосьовою анізотропією відстань між піками залежить від коефіцієнту анізотропії ( $\epsilon_{\parallel}/\epsilon_{\perp}$ ). Дану властивість тонкого діелектричного резонатора можна покласти в основу методу дослідження НВЧ характеристик анізотропних кристалів.

Даним методом було досліджено зразки  $LiNbO_3$ . Вимірювання було проведено з використанням векторного аналізатора AGILENT E8364B (500 MHz – 50 GHz). Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 23.

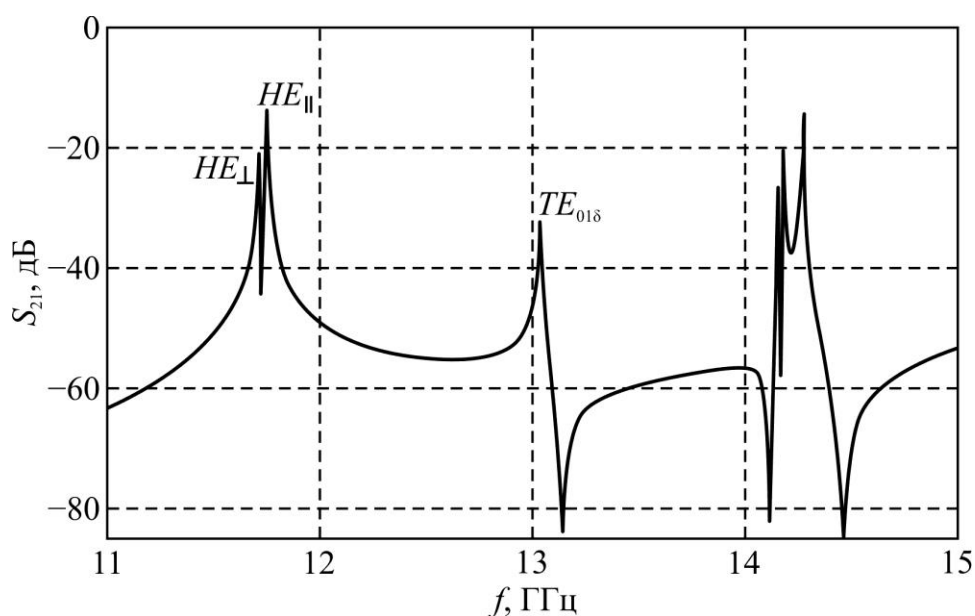


Рис. 22. Частотна залежність коефіцієнта передачі екранованого тонкого діелектричного резонатора у випадку анізотропії. Має місце два резонансних піка: HE- $\perp$  и HE- $\parallel$

З отриманих результатів слідує, що резонансна частота  $TE_{01\delta}$  моди залежить від ефективної діелектричної проникності зразка, а резонансні частоти HE-мод залежать від діелектричних проникностей матеріалу ДР вздовж відповідних осей. При цьому різниця між частотами HE- мод залишається практично незмінною за умови фіксованого значення коефіцієнта анізотропії, що вказує на можливість використання методу тонкого діелектричного резонатора для дослідження анізотропних діелектричних матеріалів.

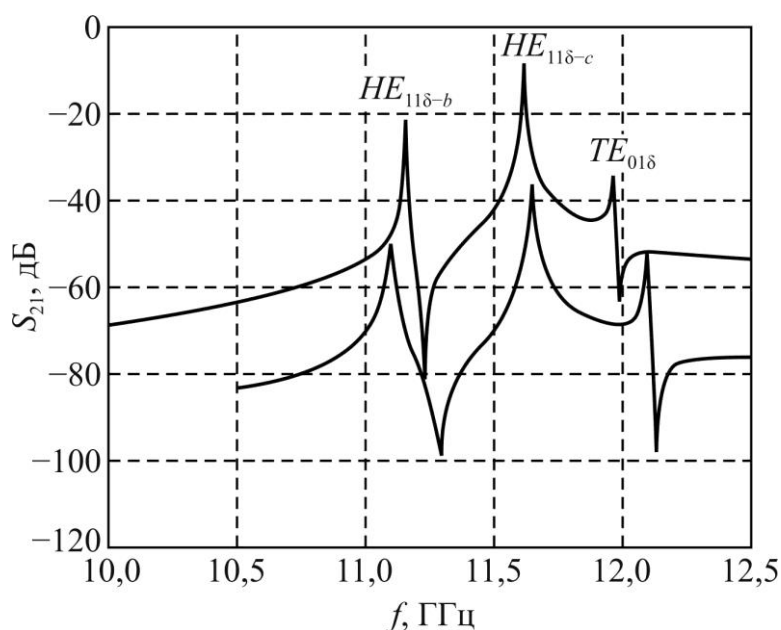


Рис. 23. Залежність  $S_{21}$  від частоти  $\text{LiNbO}_3$  ДР товщиною 0,5 мм, розрахунок (верхня крива) і експеримент (нижня крива)

## ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень, що проведено у роботі:

1. Розвинено теорію композитних матеріалів, а саме отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів ефективної діелектричної проникності та ефективного тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу діелектрик-метал. Запропоновано алгоритми розрахунку частотних і температурних характеристик мікро- та макротекстурованих композитних матеріалів у НВЧ діапазоні, що дозволяє спростити процес розробки композитних матеріалів з заданими характеристиками.
2. Вперше застосовано теорію композитних матеріалів до розробки композитних керованих пристроїв НВЧ, що дозволило вирішити важливу технічну проблему створення адаптованого до інженерного використання системного підходу до розробки композитних компонентів НВЧ та керованих пристроїв на їх основі.
3. Доповнено та узагальнено теорію керування електродинамічними характеристиками частотно-селективних пристроїв НВЧ, що дозволило реалізувати компоненти нового класу частотно-селективних пристроїв НВЧ на основі планарних та тонких діелектричних резонансних структур з електромеханічним та оптичним керуванням. Запропонована конструкція фільтру на основі відрізків мікросмужкових ліній із ступінчастою неоднорідністю використана при виконанні НДР у ІСТЕ СБУ.
4. Запропоновано удосконалену конструкцію актюатора та керуючих елементів на його основі для застосування в техніці НВЧ, що дозволило покращити лінійність керувальної характеристики електромеханічних керуючих елементів НВЧ.
5. Вперше теоретично та експериментально досліджено властивості тонких діелектричних резонаторів, що створило умови для розробки частотноселективних

покриттів різноманітного призначення на основі решіток тонких діелектричних резонаторів, а також дозволило розробити нові методи вимірювання НВЧ характеристик діелектричних матеріалів, у тому числі тонких плівок та анізотропних матеріалів. Запропоновані в роботі нові методи використані під час виконання ряду держбюджетних робіт у КПІ імені Ігоря Сікорського, у інституті загальної та неорганічної хімії НАНУ, у Донецькому фізико-технічному інституті імені О.О. Галкіна НАНУ та у навчальному процесі у курсі «Мікроелектроніка НВЧ» і можуть бути адаптовані для промислових потреб як методи неруйнівного контролю параметрів НВЧ матеріалів на підприємствах, які виготовляють НВЧ прилади.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації.**

#### **Публікації у фахових виданнях:**

1. В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, Резонатори на основі короткозамкнених відрізків неоднорідних ліній із ступінчастою неоднорідністю//«Электроника и связь», 2002, №16, С.47-48. Особистий внесок дисертанта: розрахунок параметрів досліджуваних зразків, участь у експериментальному дослідженні зразків.
2. В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, А.В. Єременко Напівпровідникові резонансні структур із електронним керуванням //«Электроника и связь», 2003, №19, С.17-19. Особистий внесок дисертанта: розробка теоретичних основ розрахунку характеристик напівпровідникових резонансних структур, участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень.
3. В.І. Молчанов, Д.Д. Татарчук Неоднородности в диэлектрических структурах СВЧ// «Электроника и связь», 2008, №6(47), с. 10-14. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень, а також у інтерпретації отриманих результатів.
4. В.І. Лапчинский, А.В. Мачулянский, Д.Д. Татарчук, Т.Л. Волхова Металлодиэлектрические нанокompозитные структуры. //«Электроника и связь», 2011, №1, С.20-22. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, планування експерименту та інтерпретація отриманих результатів.
5. Температурная зависимость диэлектрических параметров композитных материалов металл-полимер в СВЧ-диапазоне. Ю.В. Диденко, И.В. Пацёра, Д.Д. Татарчук, Е.И. Харabet // Электроника и связь. – 2012. – №5. – С. 132 - 134. Особистий внесок дисертанта: розробка теоретичних основ розрахунку температурної залежності діелектричної залежності і тангенса кута діелектричних втрат композитів метал-полімер, розробка методики досліджень, участь в інтерпретації отриманих результатів.
6. Диденко Ю.В. Многослойные покрытия на основе композитных материалов для защиты от электромагнитного излучения / Ю.В. Диденко, И.В. Пацёра, Д.Д. Татарчук // Прикладная радиоэлектроника. — 2012. — Т. 11, № 4. — С. 519—521. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, участь в інтерпретації отриманих результатів.

7. Ю.В. Діденко, В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, А.С. Франчук «Температурні властивості напівпровідникових резонансних структур з електронним керуванням» // «Электроника и связь». – 2013. – №5. – С. 9 - 12. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, участь у інтерпретації результатів.
8. Y.V. Didenko, D.D. Tatarchuk, V.I. Molchanov, and Y.M. Poplavko “Effective conductivity of microwave dielectric materials” // «Электроника и связь». – 2014. – т. 19, №2(79). – С. 23 - 29. (ISSN 1811-4512. ElectronComm 2014, Vol. 19, №2(79)). Особистий внесок дисертанта: теоретичне дослідження впливу взаємодії релаксуючих часток з різним часом релаксації на результуючий діелектричний спектр матеріалу у НВЧ діапазоні.
9. Татарчук Д.Д. Термостабільність коливальних НВЧ систем на основі діелектричних резонаторів / Шмигін Д.А., Татарчук Д.Д. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – № 1. – С.65-69. Особистий внесок дисертанта: розрахунок температурної залежності резонансної частоти досліджуваних зразків, участь у плануванні експерименту та у інтерпретації отриманих результатів.
10. Didenko Y.V. The specific conductivity of metal-polymer composites in the microwave range / Yuriy Didenko, Dmitry Tatarchuk, Iryna Patsora, Ievgen Kharabet, Anton Franchuk // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №3(80). – PP. 9–12. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретації отриманих результатів.
11. Didenko Y.V. Temperature Dependences of Losses in High Frequency Dielectrics / Y.V. Didenko, Y.M. Poplavko, D.D. Tatarchuk // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №4(81). – PP. 28–35. Особистий внесок дисертанта: теоретичне дослідження впливу взаємодії релаксуючих часток з різним часом релаксації на температурну залежність НВЧ втрат.
12. СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора // Electronics and Communications. – 2014, – Vol. 19. – №6(83)) – PP. 14–20. Особистий внесок дисертанта: теоретичне та експериментальне дослідження залежності резонансної частоти діелектричних резонаторів від непаралельності їх складових частин.
13. Молчанов В.І. Вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів методом тонкого діелектричного резонатора/ В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, А.С. Франчук // Electronics and Communications. – 2015. – Vol. 20. – №1(84). – PP. 23–26. Особистий внесок дисертанта: теоретичне та експериментальне дослідження чутливості методу.
14. Татарчук Д.Д. Тонкие диэлектрические резонаторы миллиметрового диапазона длин волн / Д.Д. Татарчук, В.И. Молчанов, Ю.В. Диденко, А.С. Франчук // Electronics and Communications. – 2015. – Т. 20. – №6(89). – С. 6–10. Особистий внесок дисертанта: розрахунок параметрів досліджуваних зразків, розробка методики досліджень, інтерпретація отриманих результатів.
15. Татарчук Д.Д. Композиты на основе диэлектриков в технике СВЧ / Д.Д. Татарчук, Ю.М. Поплавко, В.А. Казмиренко, А.В. Борисов, Ю.В. Диденко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – Т. 59. – №2. – С.



- 33–43. Особистий внесок дисертанта: розробка макету керованого мікрострічкового фільтру, розрахунок теоретичних залежностей діелектричних НВЧ параметрів композитів метал-полімер, участь у проведенні експериментальних досліджень.
16. Діденко Ю.В. Температурні властивості композитів типу метал-полімер у мікрохвильовому діапазоні / Ю. В. Діденко, І. В. Пацьора, Д. Д. Татарчук // *Electronics and Communications*. – 2016. – Т. 21. – №1(90). – С. 6–10. Особистий внесок дисертанта: дисертантом одноосібно отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат композитів діелектрик-метал у НВЧ діапазоні.
17. Татарчук Д. Д. Вимірювання НВЧ параметрів матеріалів методом неоднорідного мікросмужкового резонатора / Д. Д. Татарчук, В. І. Молчанов, Ю. В. Діденко, М. С. Сергеев, Ю. М. Поплавко // *Electronics and Communications*. – 2016. – Т. 21. – №2(91). – С. 6–9. Особистий внесок дисертанта: розробка конструкції вимірювальної комірки та методики вимірювання.
18. Татарчук Д.Д. Фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів / Д.Д. Татарчук, В.І. Молчанов, Ю.В. Діденко, А.С. Франчук / *Electronics and Communications*. – 2016. – Т. 21. – №6(95). – С. 6–9. Особистий внесок дисертанта: запропоновано конструкції фільтрів та проведено розрахунок їх характеристик.
19. Татарчук Д.Д. НВЧ фазообертачі на основі тонких діелектричних резонаторів / Д.Д. Татарчук, В.І. Молчанов, Ю.В. Діденко, А.С. Франчук / *Electronics and Communications*. – 2017. – Т. 22. – №1(96). – С. 6–10. Особистий внесок дисертанта: запропоновано конструкцію фазообертача та розраховано його характеристики.
20. Patsora Iryna STUDY OF PARTICLE BASED FILMS' CURE PROCESS BY HIGH FREQUENCY EDDY CURRENT SPECTROSCOPY / Iryna Patsora, Henning Heuer, Susanne Hillmann, Dmitry Tatarchuk // *Coatings* 2017, 7(1), 3 doi:10.3390/coatings7010003. Особистий внесок дисертанта: участь у розробці методики досліджень та інтерпретації результатів.
21. Мазур К. С. Управляемые частотноселективные структуры СВЧ на основе неоднородной микрополосковой линии передачи / К. С. Мазур, А. А. Сергеева, Д. Д. Татарчук, Ю. В. Диденко // *Мікросистеми, електроніка та акустика*. – 2018. – Т. 23. – №4(105). – С. 6–11. Особистий внесок дисертанта: розробка досліджуваного макету і методики досліджень, а також участь у проведенні експериментальних досліджень.
22. Pashchenko A. V. Modification of multifunctional properties of the magnetoresistive  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.15}\text{Bi}_{0.15}\text{Mn}_{1.1-x}\text{B}_x\text{O}_{3-\delta}$  ceramics when replacing manganese with 3d-ions of Cr, Fe, Co, Ni / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, V. P. Pashchenko, V. K. Prokopenko, V. V. Burhovetskii, A. V. Voznyak, I. V. Fesych, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. I. Gudymenko, V. P. Kladko, A. A. Amirov, G. G. Levchenko // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 767. – P. 1117–1125. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.178. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.
23. Pashchenko A. V. Structure, Non-stoichiometry, Valence of Ions, Dielectric and Magnetic Properties of Single-Phase  $\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_{3-\delta}$  Multiferroics / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, Qunjun Li, D. D. Tatarchuk, V. A. Turchenko, I. I. Makoed, V. Ya. Sycheva, A. V. Voznyak, V. P. Kladko, A. I. Gudimenko, Y. V. Didenko, A. T. Kozakov,

G. G. Levchenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 483. – P. 100–113. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.03.095. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

24. Liedienov N.A., Pashchenko A.V., Turchenko V.A., Sycheva V.Ya., Voznyak A.V., Kladko V.P., Gudimenko A.I., Tatarchuk D.D., Didenko Yu.V., Fesych I.V., Makoed I.I., Kozakov A.T., Levchenko G.G. Liquid-phase sintered bismuth ferrite multiferroics and their giant dielectric constant // Ceram. Int. – 2019. – V. 45, No. 12. – P. 14873 – 14879. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.220>. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

#### **Патенти на корисну модель:**

25. Патент на корисну модель Пат. №91148 Україна, МПК Н 01 Р 7/00. Напівпровідниковий резонатор НВЧ з електронним керуванням [Текст] / Татарчук Д.Д., Молчанов В.І., Пашков В.М.; заявник і власник НТУУ «КПІ». — № u 2013 15543 ; заявл. 30.12.2013; опубл. 25.06.2014, Бюл. №12. – 4 с. Особистий внесок дисертанта: обговорення ідеї, розробка методики експериментальної перевірки ідеї, участь у інтерпретації отриманих результатів.

26. Патент на корисну модель Пат. №101015 Україна МПК H03K 17/28 (2006.01), H03K 17/78 (2006.01). ПРИСТРІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ МІЖЗ'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ У МІКРОСХЕМАХ [Текст] Циганок Б. А., Власюк А. В., Олійник О. О., Татарчук Д. Д., Пацьора І. В. ; заявник і власник НТУУ «КПІ». — №u201500908 ; заявл. 05.02.2015 ; опубл. 25.08.2015. – 4 с. Особистий внесок дисертанта: обговорення ідеї, розробка методики експериментальної перевірки ідеї, участь у інтерпретації отриманих результатів.

27. Патент на корисну модель № 107297 Україна МПК G01R 27/26 (2006.01) Комірка на основі напівхвильового мікросмужкового резонатора для вимірювання комплексної діелектричної проникності матеріалів на надвисоких частотах [Текст] Пашков Валерій Маркович (UA ); Татарчук Дмитро Дмитрович (UA ); Молчанов Віталій Іванович (UA ); Поплавко Юрій Михайлович (UA ); Діденко Юрій Вікторович (UA ); Сергєєв Михайло Сергійович (UA ) заявник і власник НТУУ «КПІ». — №u201512840 від 25.12.2015 опубл. 25.05.2016 Бюл. №10. – 4 с. Особистий внесок дисертанта: обговорення ідеї, розробка макету вимірювальної комірки.

28. Пат. 116158 Україна, МПК (2016.01) H01P 1/18, H01P 1/207. Керована надвисокочастотна система на основі тонкого діелектричного резонатора / Д. Д. Татарчук, В. І. Молчанов, Ю. М. Поплавко, Ю. В. Діденко, А. С. Франчук ; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u 2016 11812 ; заявл. 22.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с. Особистий внесок дисертанта: обговорення ідеї, числове моделювання керованої надвисокочастотної системи на основі тонкого діелектричного резонатора та участь у інтерпретації отриманих результатів.

29. Пат. 136582 Україна, МПК(2019.01) G01R 27/04, G01R 27/26. Мікросмужкова комірка для визначення діелектричної проникності та фактору втрат матеріалів на надвисоких частотах / Д. Д. Татарчук, Ю. В. Діденко, Ю. М. Поплавко ; заявник і

власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – № у 2019 02285 ; заявл. 06.03.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. – 4 с. Особистий внесок дисертанта: обговорення ідеї, розробка макету вимірювальної комірки участь у експериментальній перевірці ідеї.

#### **Матеріали конференцій:**

30. Неоднородности в диэлектрических структурах СВЧ [Текст] / В. И. Молчанов, Д. Д. Татарчук // 13 Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 8-12 сент., 2003: КрыМиКо'2003. - Севастополь, 2003. - С. 543-546. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень, а також у інтерпретації отриманих результатів.

31. В.І. Лапчинський, Д.Д. Татарчук Резонансні властивості металічних пластин у НВЧ діапазоні //XXX міжнародна науково-технічна конференція «Електроніка і нанотехнології». Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, планування експерименту та інтерпретація отриманих результатів.

32. Лапчинський В.І., к.т.н. Татарчук Д.Д. НВЧ матеріали на основі структур метал-діелектрик // Науково-практична конференція „ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ", Україна, Київ, НТУУ КПІ, 21-23, квітня, 2010. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень, планування експерименту та інтерпретація отриманих результатів.

33. Д.А. Шмыгин, Д.Д. Татарчук, А.В. Ерёмченко, В.М. Пашков, В.И. Молчанов, Ю.М. Поплавко Фильтры на основе линий передач со скачком волнового сопротивления // 20-я Международная Крымская конференция СВЧ- техника и телекоммуникационные технологии – Украина, Крым, Севастополь, 13-17 сентября, 2010. Особистий внесок дисертанта: розробка теоретичних основ розрахунку фільтрів на основі ліній передач із скачком хвильового опору та розрахунок параметрів досліджуваного макету.

34. Борисова А.В., Гергиев В.В., Молчанов В.И., Татарчук Д.Д., Якименко Ю.И. Диэлектрические свойства пьезоэлектрических монокристаллов с малым поглощением // VI Международная научно-техническая конференция «Современные коммуникационные технологии» - Украина, Крым, Ялта-Ливадия, 4-8 октября, 2010. Особистий внесок дисертанта: участь у експериментальних дослідженнях та у інтерпретації експериментальних результатів.

35. Ю.В. Діденко, І.В. Пацьора, Д.Д. Татарчук, Д.І. Царенко Композитні НВЧ матеріали для захисту каналів передачі інформації//Proceedings of System Analysis and Information Technologies 13th International Conference, SAIT 2011, Kyiv, Ukraine, May 25–29, 2010. Особистий внесок дисертанта: розробка методики експериментальних досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретація отриманих результатів.

36. В.И. Лапчинский, А.В. Мачулянский, Д.Д. Татарчук, Т.Л. Волхова Металлодиэлектрические нанокompозитные структуры. // XXXI международная научно-техническая конференция «Электроника и нанотехнологии», 12-14 апреля, 2011, Киев, Украина. Особистий внесок дисертанта: розробка методики

експериментальних досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретація отриманих результатів.

37. СВЧ свойства композитных структур металл-диэлектрик. Диденко Ю.В., Молчанов В.И., канд.техн.наук, Олексенко А.О., Пацёра И.В., Татарчук Д.Д., канд.техн.наук, Царенко Д.И. // XXXII международная научно-техническая конференция «Электроника и нанотехнологии», 10-11 апреля, 2012, Киев, Украина. Особистий внесок дисертанта: розробка методики експериментальних досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретація отриманих результатів.

38. Д.А. Шмыгин, Д.Д. Татарчук, Диденко Ю.В. Одно- и многослойные поглощающие СВЧ структуры на основе полимеруглеродных нанокompозитов // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ- техника и телекоммуникационные технологии – Украина, Крым, Севастополь, 10-14 сентября, 2012. Особистий внесок дисертанта: розрахунок характеристик досліджуваних зразків, розробка методики досліджень, участь у виготовленні досліджуваних зразків.

39. Coating to protect electronic devices from electromagnetic radiation on the base of multilayer Y. Didenko, D. Tatarchuk // VIII Международная научно-техническая конференция «Современные коммуникационные технологии» - Украина, Крым, Ялта-Ливадия, 1-5 октября, 2012. Особистий внесок дисертанта: розрахунок характеристик досліджуваних зразків, розробка методики досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретації отриманих результатів.

40. Thermal dependence of “metal-polymer” type composite materials’ dielectric properties in ultra-high frequency band. Yuriy Didenko, Iryna Patsora, Dmytro Tatarchuk, Ievgen Kharabet and Anton Franchuk // 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference «ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY» (ELNANO-2013), April 16-19, 2013, Kyiv, Ukraine. Особистий внесок дисертанта: дисертантом одноосібно отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат композитів діелектрик-метал у НВЧ діапазоні.

41. Experimental Setup for the Characterization of the Percolation Behavior of Wet Conductive Coatings by High Frequency Eddy Current Spectroscopy I. Patsora, H. Heuer, S. Hillmann, D. Tatarchuk, B. Foos // 36-th International Spring Seminar on Electronics Technology “Automotive Electronics”, Alba Iulia, on May 8th – 12th, 2013. Особистий внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретації отриманих результатів.

42. Temperature Dependences of the Dielectric Permittivity and Dissipation Factor for Nanocomposites Metal–Polymer Y. Didenko, D. Tatarchuk, I. Kharabet, A. Franchuk, Y. Yakimenko // 36-th International Spring Seminar on Electronics Technology “Automotive Electronics”, Alba Iulia, on May 8th – 12th, 2013. Особистий внесок дисертанта: дисертантом одноосібно отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних коефіцієнтів діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат композитів діелектрик-метал у НВЧ діапазоні.

43. Татарчук Д.Д., Молчанов В.И., Діденко Ю.В., Франчук А.С. Резонансні властивості р-і-п-діодів у НВЧ діапазоні // XIV Международная конференция по

математическому моделюванню (МКММ-2013) – Україна, Херсон, 17–21 вересня 2013. Особистий внесок дисертанта: розрахунок резонансних частот і добротностей досліджуваних р-і-п-діодів, участь у проведенні експериментальних досліджень.

44. Semiconductor Microwave Resonant Elements with electronic Control. Tatarchuk D.D., Molchanov V.I., Didenko Yu.V., Kharabet Ie.I. and Franchuk A.S. // IEEE 34th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY ELNANO-2014, APRIL 15-18, 2014, Kyiv, Ukraine. Особистий внесок дисертанта: розрахунок резонансних частот і добротностей досліджуваних р-і-п-діодів, розрахунок температурних коефіцієнтів резонансної частоти та добротності досліджуваних р-і-п-діодів, участь у розробці макету керованої частотоселективної комірки на основі р-і-п-діодів.

45. Nature of Losses in High Frequency Dielectrics. Poplavko Y.M., Didenko Y.V., Tatarchuk D.D. // XIII Международная конференция «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2014) – Россия, Санкт-Петербург, 2–6 июня 2014 г. Особистий внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та інтерпретації отриманих результатів.

46. Frequency dependences of the dielectric parameters of the metal-insulator composites. D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.V. Borisov // XIII Международная конференция «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2014) – Россия, Санкт-Петербург, 2–6 июня 2014 г. Особистий внесок дисертанта: розрахунок теоретичних залежностей діелектричних НВЧ параметрів композитів метал-полімер, участь у проведенні експериментальних досліджень.

47. Kharabet I.I. Modeling of parameters of composite metal-polymer systems / I.I. Kharabet, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, I.V. Patsora // 20th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014) (June 16-18, 2014, Gdansk, Poland). Особистий внесок дисертанта: дисертантом отримано вирази для розрахунку діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат композитів діелектрик-метал.

48. Ievgen Kharabet, Iryna Patsora, Henning Heuer, Dieter Joneit and Dmytro Tatarchuk Study of Carbon-Fiber-Reinforced Polymers Conductivity's Dependence on a Mechanical Strain //38-th International Spring Seminar on Electronics Technology “Novel Trends in Electronics Manufacturing” , Eger, Hungary, on May 6th – 10th, 2015. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень.

49. Microwave Passive and Active Composites Based on Dielectrics Tatarchuk D.D., Poplavko Y.M., Kazmirenko V.A., Borisov A.V. //2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 21-24, 2015, Kyiv, Ukraine, pp. 17-22. Особистий внесок дисертанта: розробка макету керованого мікροстрічкового фільтру, розрахунок теоретичних залежностей діелектричних НВЧ параметрів композитів метал-полімер, участь у проведенні експериментальних досліджень.

50. Thermal Stability of Oscillatory Systems Based on Split Dielectric Resonator Shmygin D.A., Tatarchuk D.D., Molchanov V.I., Poplavko Y.M. //2015 IEEE 35th

International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 21-24, 2015, Kyiv, Ukraine, pp. 51-54. Особистий внесок дисертанта: розрахунок характеристик складених діелектричних резонаторів, участь у проведенні експериментальних досліджень.

51. Microwave Dielectric Measurement Methods on the Base of the Composite Dielectric Resonator Tatarchuk D.D., Molchanov V.I., Pashkov V.M., Franchuk A.S. //2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 21-24, 2015, Kyiv, Ukraine, pp.231-234. Особистий внесок дисертанта: теоретичне та експериментальне дослідження залежності резонансної частоти діелектричних резонаторів від непаралельності їх складових частин.

52. EXPERIMENTAL STUDY OF PARTICLE BASED FILMS' CURE PROCESS BY HF EDDY CURRENT. I. Patsora, I. Kharabet, H. Heuer, M. Schulze, S. Hillmann, D. Joneit, D. Tatarchuk, Y. Didenko // The Twentieth International Workshop on Electromagnetic Non-Destructive Evaluation, ENDE 2015, September 21-23, Sendai, Japan, Katahira Sakura Hall, Tohoku University. Особистий внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та у інтерпретації отриманих результатів.

53. Poplavko Y.M. Microwave Dielectrics with Unstable Electronic Spectrum / Y.M. Poplavko, Y.V. Didenko, D.D. Tatarchuk // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016): Proc. of 36th Int. Sci. Conf. (April 19 – 21, 2016, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2016. – PP. 38 – 42. Особистий внесок дисертанта: участь у проведенні експериментальних досліджень та у інтерпретації отриманих результатів.

54. Pashchenko A.V. Structure Imperfection and Dielectric Properties of Single-Phase Multiferroic  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_{3-\delta}$  / A.V. Pashchenko, N.A. Liedienov, V.V. Burchovetski, V.K. Prokopenko, V.Ya. Sycheva, N.E. Pismenova, G.G. Levchenko, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016): Proc. of 36th Int. Sci. Conf. (April 19 – 21, 2016, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2016. – PP. 107 – 109. ISBN: 978-1-5090-1430-9. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

55. Pashchenko A. Composition, structure and dielectric properties of multifunctional single-phase  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  ceramics / Aleksey Pashchenko, Dmitriy Tatarchuk, Nikita Liedienov, Aleksandr Gudimenko, Valeriy Burchovetskii, Yuriy Didenko, Vasyl Prokopenko, Vasyl Kladko and Georgiy Levchenko // Materials Science & Engineering: Proc. of 5th World Congress (June 13 – 15, 2016, Alicante, Spain). – Alicante, 2016. – Vol. 5, Issue 3 (Suppl). – P. 103. (<http://dx.doi.org/10.4172/2169-0022.C1.038>). Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

56. Pashchenko A. V. Influence superstoichiometric manganese on phase composition, magnetic and dielectric properties of the  $\text{La}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$  ceramics / A. V. Pashchenko, D. D. Tatarchuk, N. A. Liedienov, V. K. Prokopenko, V. K. Prilipko, Y. V. Didenko, V. V. Burchovetskii, A. I. Gudimenko, V. P. Kladko, V. Ya. Sycheva, V. A. Pashchenko, E. N. Khatsko, V. P. Dyakonov // E-MRS 2016. Fall Meeting. Warsaw University of Technology (September 19 – 22, 2016, Warsaw, Poland). – Section Z – Functional oxides – synthesis, structure, properties and applications. p. 111. – P. 28. Особистий внесок

дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

57. Пащенко А. В. Влияние сверхстехиометрического марганца на структурные, магнитные и диэлектрические свойства наноструктурированных прессовок  $\text{La}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_{3-\delta}$  / А. В. Пащенко, Д. Д. Татарчук, Н. А. Леденёв, В. К. Прокопенко, Ю. В. Диденко, В. В. Бурховецкий, А. И. Гудименко, Н. Н. Кулик, А. В. Боднарук, В. Я. Сычева // «Наноструктурные материалы–2016: Беларусь–Россия–Украина» (НАНО–2016) ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»: материалы V Междунар. науч. конф. (22 – 25 ноября 2016 г., Минск, Беларусь). – Минск, 2016. – С. 311 – 313. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

58. Didenko Y. V. Paraelectricity and Paramagnetism in Thermostable Microwave Dielectrics /Y. V. Didenko, D. D. Tatarchuk, V. I. Molchanov, Y. M. Poplavko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2017): Proc. of 37th Int. Sci. Conf. (April 18 – 20, 2017, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2017. – PP. 31 – 36. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень.

59. Liedienov N. High Hydrostatic Pressure Effect on Functional Properties of Nanopowder  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_{3-\delta}$  Compacts with Various Dispersion / N. Liedienov, A. Pashchenko, V. Pashchenko, D. Tatarchuk, Yu. Prilipko, Y. Didenko, V. Turchenko, V. Prokopenko, A. Voznyak, I. Fesych // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2017): Proc. of 37th Int. Sci. Conf. (April 18 – 20, 2017, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2017. – PP. 71 – 74. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

60. Tatarchuk D. D. Thin Dielectric Resonators in Microwaves / D. D. Tatachuk, Y. V. Didenko, V. I. Molchanov, A. S. Franchuk, Y. M. Poplavko // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017): Proc. of Int. Sci. Conf. (May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2017. – PP. 45 – 50. Особистий внесок дисертанта: розрахунок параметрів досліджуваних зразків, розробка макетів фільтрів, експериментальне дослідження макетів фільтрів участь у інтерпретації отриманих результатів.

61. Liedienov N. A. Nanostructural clustering, structure defects and magnetic properties of the magnetoresistance  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.15}\text{Bi}_{0.15}\text{Mn}_{1.1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$  ceramics / N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, V. K. Prokopenko, V. V. Burchovetskii, V. P. Kladko, A. I. Gudimenko, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, I. V. Fesych, S. A. Nedil'ko // Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017): Proc. of V International research and practice conference (August 23 – 26, 2017, Chernivtsi, Ukraine). – Kiev : SME Burlaka, 2017. – P. 494. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

62. Pashchenko A. V. Influence of annealing temperature on defectiveness and functional properties of the  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_{3-\delta}$  multiferroics / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, V. K. Prokopenko, V. P. Kladko, A. I. Gudimenko, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. T. Kozakov, I. V. Fesych, S. A. Nedil'ko // Advanced Materials and Technologies: Proc. of 19-th International Conference-School (August 27 – 31, 2017,

Palanga, Lithuania). – Kaunas, 2017. – P. 93. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

63. Pashchenko A. V. Dielectric properties of single-phase  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_{3-\delta}$  multiferroics with perovskite structure / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, V. K. Prokopenko, V. A. Turchenko, A. V. Voznyak, I. I. Makoed, V. P. Kladko, A. I. Gudimenko, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. T. Kozakov, I. V. Fesych // European Materials Research Society. 2017 Fall Meeting (September 18 – 21, 2017, Warsaw, Poland). – N.4.26. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

64. Liedienov N. A. Magnetotransport and Dielectric Properties of Bi-Containing  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.15}\text{Bi}_{0.15}\text{Mn}_{1.1-x}\text{B}_x\text{O}_{3-\delta}$  Rare-Earth Manganites with  $\text{B} = \text{Cr, Fe, Co, Ni}$  / N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, I. V. Fesych, D. D. Tatarchuk, V. P. Kladko // IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017) (October 17 – 20, 2017, Lviv, Ukraine). Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

65. Liedienov N. Influence of Superstoichiometric Manganese on the Charge and Spin Polarization of Electron Subsystem of Magnetoresistance Ceramics / N. Liedienov, A. Pashchenko, V. Prokopenko, V. Sycheva, A. Voznyak, D. Tatarchuk, Y. Didenko, I. Fesych, and A. Pilipenko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24 – 26, 2018, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2018. – PP. 121 – 125. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

66. Mazur K.S. Filters based on segments of microstrip lines / K.S. Mazur, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.O. Serheieva // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24 – 26, 2018, Kyiv, Ukraine). – Kyiv. Особистий внесок дисертанта: розробка досліджуваного макету фільтру і методики досліджень, а також участь у проведенні експериментальних досліджень.

67. Tatarchuk D.D.. Microstrip Composite Structures with Electromechanical Control / D.D. Tatarchuk, T.L. Volkova, V.O. Lapa, A.V. Samoilov, O.H. Dramaretskyi and O.M. Zhrebets // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019): Proc. of 39th Int. Sci. Conf. (April 16 – 18, 2019, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2019. – PP. 17 – 20. ISBN Information:INSPEC Accession Number: 18882352, DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783478. Особистий внесок дисертанта: розробка досліджуваних макетів і методики досліджень, а також участь у проведенні експериментальних досліджень.

68. Tatarchuk D. D. Sillenites as Dielectric Materials with Low Microwave Absorption / D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, Y. M. Poplavko, O. A. Nemyrovych // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019): Proc. of 39th Int. Sci. Conf. (April 16 – 18, 2019, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2019. – PP. 64 – 67. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783673, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8783673>. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень.

69. Liedienov N. A. Influence of compacting pressure on functional properties of bismuth ferrite multiferroics / N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, Ziyu Wei, Yuan Mengyun, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. I. Gudimenko // Conference of Young



Scientists and Post-graduate Students (IEP-2019) (May 21 – 24, 2019, Uzhhorod, Ukraine). <https://ieeexplore.ieee.org/document/602773>. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

70. Liedienov N. A. Non-stoichiometric defects, dielectric and magnetic properties of  $\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_{3-\delta}$  multiferroics / N. A. Liedienov, Yuan Mengyun, Ziyu Wei, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, I. I. Makoed, A. I. Gudimenko, A. V. Pashchenko // Proc. of School-conference of young scientists “Modern material science: physics, chemistry, technology (MMSPCT-2019)” (May 27 – 31, 2019, Uzhgorod, Vodogray, Ukraine). – Uzhhorod, 2019. – PP. 86–87. Особистий внесок дисертанта: розробка методики досліджень та участь у проведенні експериментальних досліджень.

### АНОТАЦІЯ

**Татарчук Д.Д. Керовані композитні структури мікрохвильового діапазону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – «Твердотільна електроніка» (17 Електроніка та телекомунікації). – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

В роботі вирішується важлива науково-технічна проблема створення базису реалізації керованих пристроїв НВЧ на основі композитних, напівпровідникових та діелектричних структур з електричним та оптичним керуванням. Розвинено теорію композитних матеріалів, а саме отримано аналітичні вирази для розрахунку температурних залежностей діелектричних властивостей композитних матеріалів типу діелектрик-метал. Розроблено нову методику розрахунку характеристик керованих планарних структур. Запропоновано новий метод керування характеристиками напівпровідникових планарних пристроїв НВЧ за рахунок зміни конфігурації провідникових областей оптичним способом. Удосконалено конструкцію п'єзоперетворювача, що дозволило зменшити нелінійність його деформаційної характеристики. Розроблено новий принцип керування резонансними частотами діелектричних резонаторів шляхом зміни кута повороту резонатора відносно широкої стінки хвилеводу. Запропоновано нові методи дослідження властивостей діелектричних матеріалів.

**Ключові слова:** композитні матеріали, мікротекстуровані композити, макротекстуровані композити, композитні структури НВЧ, методи керування параметрами електродинамічних систем, керовані пристрої НВЧ, ефективна діелектрична проникність, вимірювання параметрів матеріалів.

### ANNOTATION

**Tatarchuk D.D. Controllable composite structures of the microwave range. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Doctoral thesis of technical sciences on specialty 05.27.01 – «Solid-state electronics» (17 Electronics and Telecommunications). – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The work solves an important scientific and practical problem of developing the theory of composite materials to create a basis for the implementation of new frequency-selective and phase-rotating devices based on composite, semiconductor and thin dielectric resonant structures, as well as improving microwave methods for dielectric materials exploring, including thin films.

When performing the work the following results were obtained:

1. The theory of composite materials is developed. The classification of microwave composite structures according to structural and functional features is offered. Theoretical and experimental study of microwave characteristics of polymer-metal composite materials was carried out. Analytical expressions for the calculation of the temperature coefficients of effective dielectric constant and effective tangent of dielectric loss angle of composite dielectric-metal materials were first obtained, which allows calculating the temperature properties of such composites.
2. The theory of composite materials is applied to the controlled frequency-selective planar structures and based on it the calculation method of the controlled frequency-selective planar structures characteristics is developed and experimentally confirmed, which allows the design process of the controlled frequency-selective devices and phase-shifting devices to accelerate. Designs of controlled selective microwave devices based on planar structures have been developed.
3. Theoretical and experimental research of semiconductor frequency-selective structures is carried out. For the first time, a method of controlling the characteristics of semiconductor planar frequency-selective microwave devices is proposed by changing the configuration of conductive regions by an optical method, which creates the basis for the development of fundamentally new designs of frequency-selective and phase-shifting microwave devices with optical control.
4. Based on the study of existing trends in the development of electromechanically controlled microwave devices, the requirements for modern actuators for microwave use are formulated. Based on the formulated requirements the design of the “cymbal”-type piezoelectric actuator was improved by replacing the continuous piezo-plate with two counter-plates, which reduced the nonlinearity of its deformation characteristic. Actuator designs with high vibration resistance are also proposed.
5. Theoretical and experimental research of thin dielectric resonators is carried out, designs of selective microwave devices on their basis are proposed.
6. New principle for the resonant frequencies control of the dielectric resonators by changing the angle of rotation of the resonator with respect to the wide wall of the waveguide were proposed for the first time, which made it possible to develop new designs of controlled filters and phase shifters. Precise control of the position of the resonator in this case is carried out using a stepper motor controlled by a microprocessor, which allows to eliminating such disadvantage of traditional electromechanical control as hysteresis.
7. According to the results of theoretical and experimental study of planar structures the technique of dielectric materials parameters measurements on the basis of inhomogeneous microstrip resonator is developed.

8. Based on the theory of composite materials and the results of the study of thin dielectric resonators, the Krupka's method was modified to determine the dielectric constant and the tangent of the dielectric loss angle of thin films. The proposed method allows measuring the parameters of film materials in the thickness from tens of nanometers to several micrometers.

9. Based on the results of the study of a thin dielectric resonator a new method of investigation of the properties of anisotropic materials is proposed when using the test sample as a thin dielectric resonator.

The new methods of managing the characteristics of microwave structures presented in the paper are protected by patents of Ukraine for utility models.

The design of a microstrip filter with stepwise inhomogeneity was used in the development of special tools for the security service of Ukraine.

The methods of research of microwave materials offered in work were tested at carrying out of scientific researches in Donetsk physical and technical institute of the O.O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine and at the Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Key words:** composite materials, microtextured composites, macrot textured composites, microwave composite structures, control methods for the parameters of electrodynamics systems, controlled microwave devices, effective dielectric permittivity, material parameters measurements.